

Ensino rápido de células de quinagem ADIRA

Trabalho realizado na ADIRA S.A.

Daniel Alves Coelho

Dissertação do MIEM

Orientador na ADIRA: Engº Rui César

Orientadores na FEUP: Prof. António Mendes Lopes; Prof. Paulo Abreu



FEUP

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Outubro de 2011

Resumo

As quinadoras são máquinas industriais usadas para a dobração (ou quinagem) de chapas metálicas, e são um equipamento muito comum na indústria, tradicionalmente de operação manual dado que as chapas têm que ser manuseadas individualmente para serem colocadas na quinadora, tornando este processo bastante lento. A substituição de operadores da quinadora por um robô visa aumentar a produtividade e qualidade do processo, dando origem a uma célula de quinagem. No entanto, as células robotizadas implicam tempos de preparação elevados, maioritariamente devido ao ensino do equipamento robótico, realizado tradicionalmente através de uma consola de programação, pelo que a sua utilização deste equipamento só se torna vantajosa na produção de lotes de grande dimensão. A programação *off-line* de robôs é particularmente pertinente neste objetivo, já que permite a realização do ensino do robô num ambiente virtual e exportação da programação gerada para o equipamento, minimizando o tempo em que a produção está parada durante a preparação da célula para o próximo trabalho.

A ADIRA, fabricante de quinadoras e fornecedor de soluções de quinagem robotizada, propôs este trabalho, que visa a exploração de métodos de agilização da preparação (ou *setup*) de células de quinagem, de modo a que a sua utilização se torne mais interessante na produção de lotes de menor dimensão, mais frequentes no domínio da quinagem de chapa metálica.

Foi realizada uma primeira abordagem à quinagem de chapa e à automatização deste processo. Foi de seguida dado um especial enfoque à programação *off-line* de células de quinagem, com a utilização e teste de um software de simulação e programação deste tipo numa célula de quinagem nas instalações da ADIRA, com potencialidades de programar tanto o robô como a quinadora.

Os resultados da implementação da programação na célula real não permitiram realizar testes com a manipulação e quinagem de peças, mas revelaram-se encorajadores, na medida em que os obstáculos surgidos foram sendo ultrapassados, e a deteção de erros e limitações detetadas no software testado contribui para o seu desenvolvimento.

Fast Setup of ADIRA Sheet-Metal Bending Cells

Abstract

Press-brakes are industrial machines with a much common use in industry, and are designed for the bending of sheet-metal parts. This equipment is traditionally operated manually due to the need of placing the sheet-metal parts individually into the press-brake work area. The replacement of human operators by robots has the goal to improve both productivity and product quality, thus giving birth to bending cells. Yet, robotized cells imply considerable setup times, mainly due to the teaching of the robotic equipment, traditionally achieved by manual programming using a teach pendant, so that the use of this equipment is more adequate when manufacturing large batches of parts. Off-line robot programming is particularly useful in this matter, so that it enables robot teaching in a virtual model, and transferring the programs directly into the equipment, thus minimizing the production downtime needed to change the cell setup in order to start a new job.

ADIRA, a press-brake manufacturer and robotized bending solutions provider, proposed this study in order to explore methods to accelerate the setup process of bending cells, so that its use may become more fitted for small batch manufacturing, more usual in the sheet-metal bending industry.

A first approach was made to bending of sheet-metal itself, and the automation of this process. Off-line programming of bending cells was then given a strong focus, with the test of an off-line simulation and programming software in ADIRA equipment, with potential to program both robot and press-brake.

The results of the programming implementation in the real cell did not allow the testing of bending and handling real parts, but they were still encouraging. As solutions were found to the problems that emerged during the process, error detection and software limitation analysis contributed to the software's improvement and development in the nearby future.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer primeiramente aos meus orientadores, Prof. António Mendes Lopes e Prof. Paulo Abreu, pelo apoio e disponibilidade presentes durante o trajeto desta dissertação.

Agradeço ao meu orientador na ADIRA, Engº Rui César pelo aconselhamento dado no planeamento do trabalho experimental.

Endereço um agradecimento especial ao Engº Carlos Teixeira, pelo acompanhamento e apoio prestados ao longo da realização deste trabalho na ADIRA e ao pessoal desta empresa no geral, pela amabilidade com que fui recebido.

Expresso também os meus agradecimentos ao Prof. Francisco Freitas, coordenador da opção de Automação, pelo apoio e acompanhamento efetuado ao longo do semestre.

Índice de Conteúdos

Resumo	i
Abstract.....	iii
Agradecimentos.....	v
Índice de Figuras	ix
1. Introdução.....	1
1.1 Enquadramento Institucional	1
1.2 A empresa ADIRA.....	1
1.2.1 Clientes e aplicações	2
1.2.2 Resumo histórico.....	3
1.3 Objetivos e motivações do projecto.....	5
1.4 Metodologia	6
1.5 Organização e temas abordados neste documento.....	7
2. A automação da quinagem de chapa metálica.....	9
2.1 Caracterização do processo de quinagem de chapa	9
2.1.1 Os diferentes tipos de quinagem	12
2.2 Caracterização das quinadoras da ADIRA	14
2.3 Automatização do processo de quinagem.....	18
2.3.1 Motivações para automatizar o processo de quinagem.....	19
2.3.2 A robótica na automatização do processo de quinagem	20
2.3.3 Células robotizadas	22
2.3.4 Células de quinagem robotizadas.....	23
2.4 Pontos críticos da mudança de <i>setup</i> em células de quinagem.....	31
3. Programação <i>off-line</i> de células de quinagem	35
3.1 Programação de robôs.....	36

3.2	Softwares de simulação <i>off-line</i> existentes	39
3.2.1	Softwares de simulação/programação genéricos.....	40
3.2.2	Soluções integradas para quinagem	42
4.	Software de programação <i>off-line</i> RoboWave Bending	45
4.1	Visão geral	45
4.2	Importação e edição de modelos CAD	51
4.3	Programação e simulação	53
4.4	Pós-processamento.....	56
4.4.1	Estruturação da programação do robô.....	56
5.	Simulação e programação <i>off-line</i> da célula de quinagem ADIRA.....	59
5.1	Célula ADIRA	59
5.1.1	Adaptação da quinadora convencional para ser operada por robô.....	60
5.1.2	Descrição de funcionamento da célula de quinagem ADIRA.....	61
5.2	Objeto do estudo	63
5.2.1	Modelação da célula da ADIRA	64
5.2.2	Simulação de ciclo de quinagem.....	71
5.2.3	Teste na célula real.....	78
5.3	Dificuldades na implementação e resolução de problemas	80
5.3.1	Modelação de objetos.....	80
5.3.2	Simulação e programação	80
5.3.3	Implementação na célula real.....	82
6	Conclusões e trabalhos futuros	87
6.1	Conclusões	87
6.2	Trabalhos futuros	88
7	Referências bibliográficas	89
	ANEXO - Questionário sobre a programação de células de quinagem ADIRA.....	91

Índice de Figuras

Figura 1 - Instalações da ADIRA na Rua António Bessa Leite, no Porto (www.adira.pt)	2
Figura 2 - Quinadora hidráulica ascendente dos anos 60 (www.adira.pt).....	3
Figura 3 - Centro de corte laser com sistema de armazenamento e manuseamento de chapa (www.adira.pt)	4
Figura 4 - Célula de quinagem robotizada com alimentador de chapa (www.adira.pt) ...	5
Figura 5 - Quinagem típica de chapa a 90 graus (http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.42.485&rep=rep1&type=pdf).....	9
Figura 6 - Elementos (à esquerda) e pormenor (à direita) de uma quinadora genérica..	10
Figura 7 - Diferentes formas obtidas por quinagem (http://wiki.ued.ipleiria.pt/wikiEngenharia/index.php/Quinagem)	11
Figura 8 - Chapa com linhas e sequência de quinagem (à esquerda) e quinagem completa (à direita).....	12
Figura 9 - Esquema de quinagem "no ar" (www.ciri.org.nz/bendworks/bending.pdf) ..	13
Figura 10 - Esquema de quinagem "em v" (www.ciri.org.nz/bendworks/bending.pdf)	13
Figura 11 - Esquema de quinagem "em u" (www.ciri.org.nz/bendworks/bending.pdf)	13
Figura 12 - Esquema de quinagem "a fundo" (www.ciri.org.nz/bendworks/bending.pdf)	13
Figura 13 - Esquema da quinagem “de flanges com punção de arrasto” (www.ciri.org.nz/bendworks/bending.pdf)	14
Figura 14 - Esquema da quinagem rotativa	14
Figura 15 - Quinadora ADIRA da gama PM (www.adira.pt)	15
Figura 16 - Quinadora ADIRA da gama PA (www.adira.pt).....	16
Figura 17 – Quinadora ADIRA da gama PF (www.adira.pt).....	16
Figura 18 – Quinadoras ADIRA da gama PH, com arranjo em tandem (www.adira.pt)	17
Figura 19 - Enquadramento da produção com células de quinagem	21
Figura 20 – Célula de soldadura robotizada ABB com 3 robôs	22
Figura 21– Alusão à substituição de operadores humanos por robôs.....	23
Figura 22 – Exemplo de célula de quinagem Motoman.....	25

Figura 23 – Etapas da quinagem assistida por robô (http://www.motoman.dk/uploads/media/Pressbrake_en_02.pdf)	26
Figura 24 - Discos “master” e “tool”, produto comercial da empresa de automação ATI (http://www.robots.com/images/blog/ati.jpg).....	27
Figura 25 - Robô FANUC com sistema de troca rápida de ferramentas ATI (http://www.robots.com/images/blog/dsc_0028-02-01-2010.jpg)	27
Figura 26 – Sistema ATC da marca de ferramentas WILA	28
Figura 27 – Célula de quinagem LVD, com um robô KUKA (http://www.lvdgroup.com/pictures/products/633456609708568750.jpg)	30
Figura 28 – Célula de quinagem SAFAN I-Brake	30
Figura 29 – Aplicabilidade de softwares de programação <i>off-line</i> em células de quinagem	32
Figura 30 – Programação de robô por guiamento, de forma indireta.....	37
Figura 31 – Programação de robô por guiamento, de forma direta	37
Figura 32 – Programação de robô através de consola (http://www.motoman.dk/uploads/media/Pressbrake_en_02.pdf)	38
Figura 33 – Programação de robô através de software <i>offline</i> (http://www.motoman.dk/uploads/media/Pressbrake_en_02.pdf)	38
Figura 34 – Sequência de tarefas compreendidas na utilização de softwares de programação off-line de robôs.....	39
Figura 35– Modelo de célula de quinagem com o software Robotstudio (http://www05.abb.com/global/scot/scot241.nsf/veritydisplay/bf9603a1e4ec66e9c125764a00477c50/\$file/ROBO148EN_A%20HR.pdf)	43
Figura 36 – Simulação de quinagem com o software Robosoft	43
Figura 37 – Modelação de peça para quinagem com o RoboWave Bending	46
Figura 38 – Princípio de funcionamento das garras do RoboWave Bending (http://www.robowave.com/images/stories/doc/RoboWave_bending_technical_presentation_ENG.pdf)	47
Figura 39 - Definição automática do processo de quinagem do RoboWave Bending (http://www.robowave.com/images/stories/doc/RoboWave_bending_technical_presentation_ENG.pdf)	49
Figura 40 – Simulação de célula de quinagem com o RoboWave Bending.....	50
Figura 41 – Esquema da utilização do software RoboWave Bending	51
Figura 42 – Esquema de modelação de esbarro com o RoboWave Bending	52

Figura 43 – Aplicação de modelação de <i>gripper</i> do RoboWave Bending	52
Figura 44 – Aplicação de edição de célula de quinagem do RoboWave Bending (http://www.robowave.com/images/stories/doc/RoboWave_bending_technical_presentation_ENG.pdf)	52
Figura 45 – Procedimento e subáreas na geração da programação com o RoboWave Bending.....	53
Figura 46 – Definição do processo de quinagem com o RoboWave Bending (http://www.robowave.com/images/stories/doc/RoboWave_bending_technical_presentation_ENG.pdf)	54
Figura 47 – Alteração de trajetórias do robô com o RoboWave Bending.....	55
Figura 48 - Programação da paletização com o RoboWave Bending	55
Figura 49 - Lógica de pós-processamento para quinadora (à esquerda) e robô (à direita) com o RoboWave Bending (http://www.robowave.com/images/stories/doc/RoboWave_bending_technical_presentation_ENG.pdf)	56
Figura 50 – Lógica de pós-processamento para o robô com o RoboWave Bending.....	57
Figura 51– Estrutura da programação do robô com o RoboWave Bending (http://www.robowave.com/images/stories/doc/RoboWave_bending_technical_presentation_ENG.pdf)	58
Figura 52 – Célula de quinagem da ADIRA (www.adira.pt)	59
Figura 53 – Hierarquia de comando nas células de quinagem da ADIRA	61
Figura 54 - Fluxograma descritivo do funcionamento das células de quinagem da ADIRA.....	62
Figura 55 – Aspeto da simulação com o software Robotstudio da ABB	64
Figura 56 – Europallet 1200x800 modelada em Solidworks	65
Figura 57 – Aplicação de edição da quinadora do RoboWave Bending	66
Figura 58 – Aplicação de edição do robô do RoboWave Bending	67
Figura 59 - <i>Gripper</i> pneumático modelado para a simulação com a célula da ADIRA.	68
Figura 60 - Disposição dos elementos na célula de teste da ADIRA	68
Figura 61 - Excerto do código de ficheiro de calibração dos objetos da célula da Motoman.....	69
Figura 62 – Medição das distâncias entre elementos da célula real da ADIRA.....	70
Figura 63 – Modelação da célula virtual de quinagem ADIRA	71
Figura 64 – Exercício de modelação da célula virtual de quinagem	72

Figura 65 - Sequência de utilização da aplicação de programação do RoboWave	
Bending.....	73
Figura 66 – Definição da prensão de chapa plana	74
Figura 67 – Definição da paletização de produtos acabados.....	75
Figura 68 – Estrutura do programa gerado para simulação gráfica.....	76
Figura 69 - Visualização da trajetória descrita entre pontos num movimento “de transporte”	77
Figura 70 - Visualização da trajetória descrita entre pontos num movimento “de fase”	77
Figura 71 – Procedimento de testes na célula real e despiste de erros	79
Figura 72 – Esforço da 5ª junta do robô durante a fase de quinagem (www.adira.pt)....	81
Figura 73 – Eixo suplementar do robô Motoman utilizado nos testes	84

1. Introdução

1.1 Enquadramento Institucional

O trabalho aqui apresentado enquadra-se na unidade curricular de Dissertação, etapa final do MIEM – Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, opção de Automação, lecionado na FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Este estudo sobre o “Ensino rápido de células de quinagem ADIRA” surge da necessidade da empresa, de modo a poder proporcionar novas soluções aos seus clientes com vista à agilização do processo de *setup* dos seus equipamentos de manipulação robótica em quinadoras. Foi proposto que este estudo fosse realizado por um estudante finalista da área de Automação da FEUP, de modo a poder aplicar os seus conhecimentos e ter uma participação ativa nesta área.

A ADIRA e a FEUP gozam de uma relação de cooperação de longa data. Foi nos meados dos anos 60 que surgiu uma colaboração entre as duas instituições, cujos resultados mais expressivos foram a produção do primeiro comando numérico português e a criação de servomecanismos electrónico-hidráulicos para o sincronismo de movimentos. Por outro lado, foi criada na FEUP por essa altura uma disciplina obrigatória no curso de Engenharia Mecânica, lecionada por engenheiros da ADIRA, denominada Comandos Hidráulicos.

1.2 A empresa ADIRA

A ADIRA S.A. (www.adira.pt) dedica-se à conceção, fabrico e comércio de máquinas ferramenta para corte e quinagem de chapa. Produz guilhotinas, quinadoras, centros de corte por laser e sistemas automáticos de carga, descarga e armazenamento de chapa.

Além da venda, instalação e assistência técnica dos equipamentos, presta um serviço abrangente que compreende formação dos operadores, técnicos de programação

e de manutenção, instalação de equipamentos de segurança e acondicionamento de equipamentos mais antigos. Conjuntamente com os clientes define soluções de ferramentas especiais, equipamentos auxiliares à produção, *layouts* e processos produtivos, sistemas de movimentação, de armazenagem, de logística e equipamentos especiais personalizados.

A ADIRA S.A. não é uma empresa isolada mas sim um grupo empresarial, composto pela ADIRA, pela GUIFIL (concorrente adquirido em 1999) e pela OXISOL (que se ocupa de toda a construção soldada e oxicortes), contando nas suas fileiras com cerca de 200 colaboradores. As instalações da "casa-mãe" situam-se na Rua António Bessa Leite no Porto e ocupam aproximadamente 10000 m², distribuídos por 2 pavilhões. Na Figura 1 é possível identificar facilmente o pavilhão com o logotipo da empresa, que é ocupado pela administração, serviços financeiros e pela montagem e fabrico de algumas peças dos centros de corte por laser.



Figura 1 - Instalações da ADIRA na Rua António Bessa Leite, no Porto (www.adira.pt)

O pavilhão que se encontra do lado direito do referido pavilhão nesta Figura é ocupado pelos gabinetes técnico e comercial e ainda pelas linhas de montagem das guilhotinas e quinadoras.

1.2.1 Clientes e aplicações

Parceiros de negócio de Instituições e Empresas como a NASA, Boeing, Lockheed, Bombardier, OGMA, Tap Portugal, Air France, Vulcano, Salvador Caetano, Metalgalva, Galucho, Leci-Trailer, Zamarbu, Siemens, Motorola, Efacec, Alfa Laval, Thyssen, Carrier e US Navy, a ADIRA disponibiliza soluções utilizadas em áreas de

negócio tão variadas como a indústria automóvel, aeronáutica, estaleiros navais, telecomunicações, computadores, energias renováveis, ambiente, ar condicionado, mobiliário metálico e de escritório, artigos de design, construções metálicas, cutelarias, elevadores, armaduras elétricas, refrigeradores e arrefecedores.

1.2.2 Resumo histórico

A empresa, fundada por António Dias Ramos, iniciou a sua atividade em 1956 com cinco trabalhadores e uma pequena oficina de cerca de 400 m², ocupando-se então de trabalhos de mecânica geral, nomeadamente pequenas reparações, adaptações e fabrico de peças e máquinas várias para outras indústrias (alimentar, têxtil, cordoaria).

A primeira guilhotina, ainda mecânica, foi construída em 1961. Em 1964, com a primeira quinadora ascendente tipo QH (Figura 2), a ADIRA foi a primeira empresa portuguesa a fabricar máquinas ferramentas com acionamento hidráulico. Em 1968, deu-se início à fabricação das primeiras guilhotinas hidráulicas de ângulo variável, as GHV e, em 1969, às quinadoras descendentes com sincronismo electro-hidráulico, as QIH.



Figura 2 - Quinadora hidráulica ascendente dos anos 60 (www.adira.pt)

Uma colaboração com a Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto leva à criação de uma disciplina de Comandos Hidráulicos, obrigatória no curso de Engenharia Mecânica, com regência a cargo de engenheiros da ADIRA. Por outro lado essa colaboração, nomeadamente com os então jovens doutorados chegados de Inglaterra com novidades em micro-processamento, traduziu-se num novo avanço

tecnológico: a produção do primeiro comando numérico português e, um pouco mais tarde, no lançamento dos servomecanismos electrónico-hidráulicos para o sincronismo de movimentos.

Durante os anos 80 a empresa desenvolveu e instalou nas suas quinadoras multi-eixo comandos numéricos gráficos DNC a 2 e 3 dimensões e instalou a primeira rede de programação remota de máquinas. Fabricou o primeiro centro de corte baseado na alimentação frontal de guilhotinas, com sistemas de manuseamento de chapa integrados e empilhamento das tiras cortadas. Renovou o parque de máquinas em 85/86 com a introdução de máquinas CNC e das novas tecnologias de informação CAD/CAE/CAM. A Oxisol foi criada em 1989 a partir das secções de oxicorte e soldadura, com instalações em Canelas.

Nos anos 90 a ADIRA tornou-se a primeira empresa europeia a ser certificada ISO 9000, e o primeiro fabricante mundial a ter a certificação CE em toda a sua gama de produtos. Tudo isto aliado ao desenvolvimento de novas quinadoras extremamente flexíveis com sistemas modulares multi-eixos e troca rápida de ferramentas, o que ajudou a cimentar a sua posição a nível mundial. Em 1999 efetuou-se a compra da GUIFIL, sua concorrente na altura.

No início do novo milénio (2001) foi efetuado o desenvolvimento e produção do primeiro centro de corte por laser do país, bem como os sistemas de armazenamento e manuseamento de chapa tais como o Lift-Adiramatic Tower, ambos ilustrados Figura 3.



Figura 3 - Centro de corte laser com sistema de armazenamento e manuseamento de chapa (www.adira.pt)

Em 2002 apresentou-se uma célula robotizada de quinagem (Figura 4), por associação de unidades robotizadas às quinadoras para a manipulação de chapa e produtos acabados.

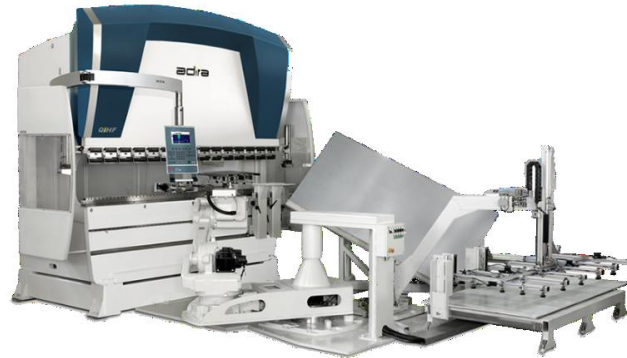


Figura 4 - Célula de quinagem robotizada com alimentador de chapa (www.adira.pt)

Ao nível das quinadoras e guilhotinas, fizeram-se evoluções importantes a nível de *design* e qualidade ergonómica. Em 2004 foi a vez da apresentação de máquinas de grandes dimensões, como a de uma guilhotina para cortar chapa com 9 metros de comprimento, ou uma quinadora de 1350 toneladas de força por 9 metros de comprimento de quinagem, com cerca de 160 toneladas de massa e 12 eixos comandados numericamente. Em 2005 apresentou-se a gama “Eco Plus”, com capacidade de resposta às novas exigências ambientais, quer no que concerne ao respeito pelo ambiente sonoro, quer à eficiência energética. A integração dos equipamentos em sistemas de produção flexível é uma realidade cada vez mais frequente nos anos decorrentes, até à atualidade.

1.3 Objetivos e motivações do projecto

A definição dos modos operativos de uma célula de quinagem robotizada de uma forma simples, intuitiva e (sobretudo) célere, é dificultada pelos inconvenientes da usual programação online de robôs. O utilizador do equipamento tem assim que ter conhecimentos profundos nas áreas da programação de CNC (quinadora e outros eventuais equipamentos), da robótica e a linguagem de programação específica do(s) robô(s) em questão, de modo a poder operar convenientemente o equipamento.

O desempenho e produtividade das quinadoras da ADIRA podem ser aumentados se estas forem integradas em células de quinagem, por integração de um robô manipulador. Além da velocidade de operação do binómio quinadora – robô ser superior quando comparada com a operação manual, são expectáveis melhorias a nível da precisão e repetibilidade. O robô executa sempre os movimentos programados, além de não estar sujeito a eventuais falhas e fadiga humanas. O “ensino rápido” de uma célula de quinagem far-se-á sentir ao fim de um número pouco significativo de lotes, já que os tempos de *setup* do equipamento serão significativamente menores. A utilização de um software de programação que simule também o comportamento de toda a célula de uma forma expedita, será um aspeto importante para a redução dos tempos de *setup*.

Este projeto consiste, numa primeira fase, na adaptação de uma quinadora convencional para ser operada por um robô. A segunda fase passa por desenvolver técnicas de programação rápida do robô. Essas técnicas passam pelo “ensino” através de uma simulação com um software de programação *off-line*. A validação das simulações realizadas com o software de programação faz-se com recurso a um robô Motoman, disponível para esse efeito nas instalações da ADIRA. O ponto principal da segunda fase este projeto é saber se a utilização de um software de programação *off-line* nas células de quinagem é compensado com economias significativas a nível dos tempos de *setup* destas células, quando comparados com os métodos de programação atuais.

1.4 Metodologia

No início do estudo, durante a familiarização com as metodologias de desenvolvimento da ADIRA, teve lugar o levantamento dos softwares de programação *off-line* para robôs e quinadoras existentes no mercado, através de pesquisa na internet, e comparação das soluções disponíveis no domínio da quinagem. Paralelamente, fez-se uma análise à “célula de quinagem robótica ADIRA”, compreendendo o equipamento constituinte, o seu funcionamento típico e a interação entre os seus componentes, nomeadamente o robô, a quinadora e os periféricos da célula.

No contexto do ensino rápido de células de quinagem, surgiu a necessidade de ter dados concretos quanto aos pesos relativos de cada operação no tempo total de *setup* do equipamento. Assim, elaborou-se um questionário relativo à utilização de células de

quinagem ADIRA de programação *online*, que foi enviado aos seus clientes. O objetivo é o de utilizar estes dados para comparação com a alternativa de programação de células robóticas com softwares de programação *off-line*.

A familiarização com os softwares deste tipo foi realizada com a solução Robotstudio da marca de robôs ABB, com o módulo de expansão *Bending*. Posteriormente, a simulação e programação de robô e quinadora da ADIRA foi realizado através do software RoboWave da empresa italiana ERXA, também com um módulo de expansão *Bending*.

A fase de implementação passou por simular um caso prático no software RoboWave, “descarregar” o programa para a célula de quinagem real e testá-lo. A análise dos resultados envolveu a comparação entre o funcionamento da célula de quinagem em ambiente virtual e em ambiente real, a nível da fiabilidade da simulação, razoabilidade dos tempos de ciclo calculados e agilização do processo de *setup* da célula.

1.5 Organização e temas abordados neste documento

O presente documento divide-se em seis capítulos. O primeiro capítulo trata da apresentação da ADIRA S.A., o enquadramento do projeto nesta empresa, os objetivos gerais e as motivações para a sua realização.

No segundo capítulo faz-se uma breve descrição do processo de quinagem, faz-se uma análise à pertinência da automação e da robótica neste domínio, caracterizam-se sumariamente as quinadoras ADIRA incorporáveis com robô e identificam-se os obstáculos principais ao ensino rápido de células de quinagem robotizadas.

O terceiro capítulo aborda a programação de robôs e faz-se um apanhado geral dos diferentes tipos de softwares existentes para a simulação e programação de quinadoras, robôs e células de quinagem robotizadas.

No quarto capítulo faz-se uma análise crítica aos softwares utilizados, nomeadamente o RoboWave Bending da ERXA, analisado com mais pormenor com vista à sua utilização em ambiente industrial.

No quinto capítulo reporta-se a experiência do teste em célula robótica de quinagem do software RoboWave Bending e faz-se uma análise à utilização do programa do ponto de vista do utilizador.

O sexto e último capítulo destina-se às conclusões tiradas com o trabalho desenvolvido e sugestões de trabalhos futuros no desenvolvimento deste tema.

2. A automação da quinagem de chapa metálica

2.1 Caracterização do processo de quinagem de chapa

A quinagem é um processo de deformação plástica de chapa que permite o fabrico de superfícies planificáveis de geometria cilíndrica, cónica ou prismática. A máquina ferramenta utilizada para realizar estas operações designa-se por quinadora (também conhecida como quinadeira ou dobradeira), sendo o seu princípio de funcionamento muito semelhante ao de uma prensa hidráulica ou mecânica com movimento retilíneo ou rotativo, respetivamente [1] (Figura 5).

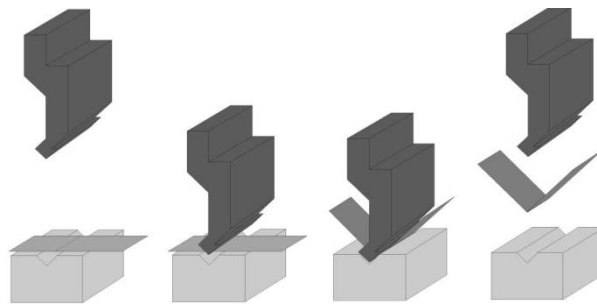


Figura 5 - Quinagem típica de chapa a 90 graus

(<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.42.485&rep=rep1&type=pdf>)

Tipicamente os flancos das quinadoras são formados por estruturas em forma de cantoneira (“C”), ligadas a uma mesa na porção inferior (avental fixo) e a uma parte móvel (avental móvel) na porção superior. A matriz é montada no avental fixo enquanto o punção é montado no avental móvel.

Uma quinadora pode ser caracterizada através de parâmetros simples, como a força desenvolvida ou o comprimento útil de trabalho. Existem outros parâmetros como a amplitude dos movimentos, o espaço disponível dentro da estrutura, distâncias aos esbarros e altura de trabalho. O avental móvel opera normalmente numa gama de velocidade entre 1 a 15 mm/s. Existem vários tipos de quinadoras que diferem quanto ao princípio de aplicação de força: mecânica, hidráulica e servo-eléctrica. Apresenta-se na Figura 6 um exemplo de quinadora genérica.

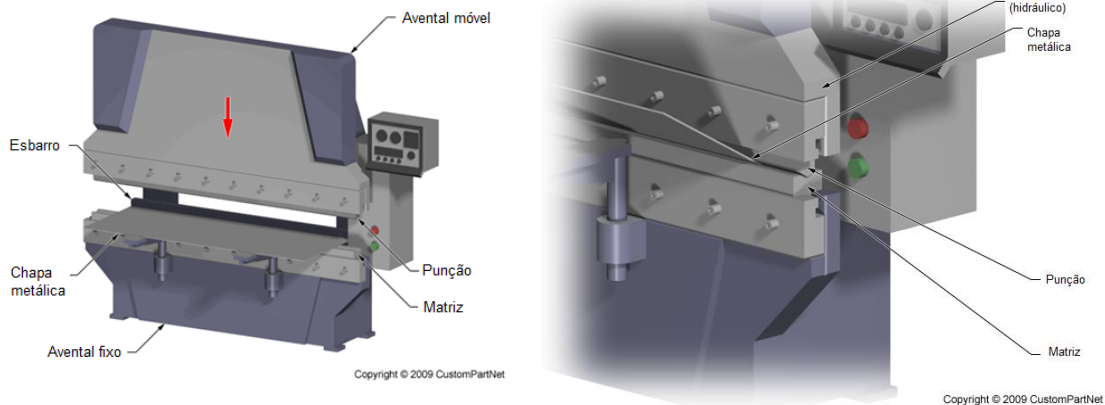


Figura 6 - Elementos (à esquerda) e pormenor (à direita) de uma quinadora genérica (<http://www.custompartnet.com/wu/sheet-metal-forming>)

Numa prensa mecânica, a energia é armazenada num volante de inércia com um motor elétrico. Uma embraiagem transmite a energia do volante de inércia de modo a ativar um mecanismo de descida do avental superior. Os pontos fortes desta solução são a velocidade e exatidão. As prensas hidráulicas operam através da sincronização de dois cilindros hidráulicos na estrutura fixa da máquina, que fazem mover o avental superior. As quinadoras servo-elétricas usam uma solução de fuso de esferas ou de transmissão por correias de modo a exercerem a força requerida.

As quinadoras mecânicas dominaram o mercado até aos anos 50. Os avanços nos domínios da hidráulica e dos controlos computadorizados levaram a que a solução hidráulica se tornasse mais popular, devido à alta qualidade dos produtos, fiabilidade no fabrico, melhoria na segurança e baixo consumo de energia. No entanto, as soluções servo-elétricas são mais utilizadas em aplicações de baixa exigência de força.

Em geral, as quinadoras caracterizam-se por possuírem uma mesa comprida e estreita, onde se podem instalar diversos tipos de ferramentas com geometrias simples, mas adequadas ao fabrico de uma grande variedade de componentes, quer na forma, quer nas dimensões (Figura 7).

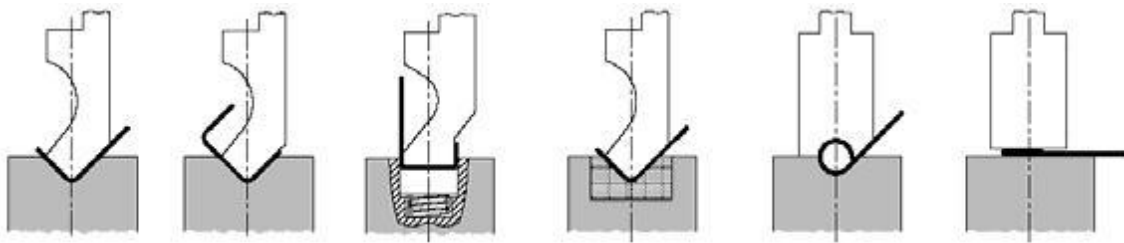


Figura 7 - Diferentes formas obtidas por quinagem
(<http://wiki.ued.ipleiria.pt/wikiEngenharia/index.php/Quinagem>)

A quinagem é sobretudo aplicada a pequenas séries de fabrico. Contudo, o estado atual de desenvolvimento das quinadoras industriais, associado à robótica e à utilização de máquinas-ferramenta complementares de apoio à produção (caso por exemplo das guilhotinas), tem vindo a permitir a integração em linhas de produção em série. No entanto, convém salientar que através da quinagem se podem obter as mais variadas geometrias, desde as mais simples às mais complexas, sendo, por isso, variado o seu campo de utilização como processo de fabrico. Destacam-se, a título de exemplo, o fabrico de balcões frigoríficos, de mobiliário metálico, de chassis para as indústrias automóvel, agrícola ou ferroviária, de estruturas metálicas para painéis de casas pré-fabricadas, para coberturas, para contentores, para transportadores, etc [2].

A conceção e o projeto de peças quinadas e do próprio processo de fabrico envolvem um conjunto de procedimentos, dos quais se destacam: a determinação da geometria e das dimensões da estampa plana, o projeto ou a seleção das ferramentas mais adequadas à operação, a quantificação da recuperação elástica do material, a escolha dos parâmetros processuais da operação e a seleção da máquina-ferramenta. Um problema típico de quinagem envolve a obtenção de uma peça com forma bem definida através de dobragens (quinagens) sucessivas de uma chapa inicialmente plana (Figura 8)..

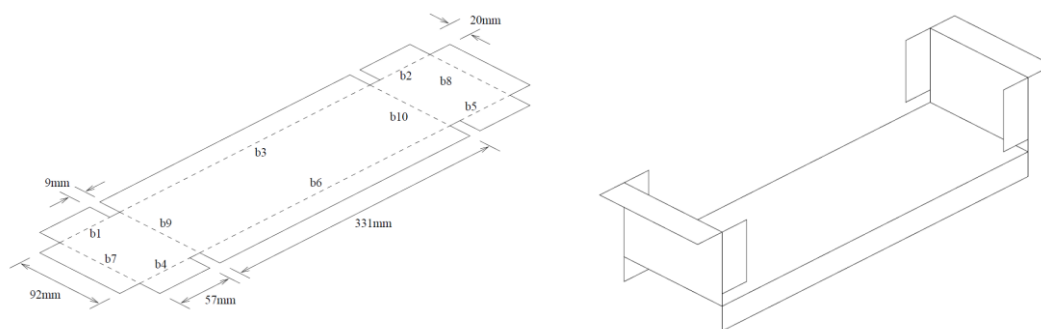


Figura 8 - Chapa com linhas e sequência de quinagem (à esquerda) e quinagem completa (à direita)
(<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.42.485&rep=rep1&type=pdf>)

É importante salientar que a mesma quinagem pode ser realizada de duas formas, já que uma das duas faces (que surgem quando se efetua a dobra) terá que ser forçosamente posicionada no exterior da quinadora. Assim, para especificar uma quinagem é necessário indicar tanto a linha de dobragem como a orientação da chapa [3].

2.1.1 Os diferentes tipos de quinagem

Existem diferentes modos de efetuar uma operação de quinagem, caracterizando-se a operação, no essencial, pela geometria das ferramentas e também pelo modo como a chapa é solicitada entre o punção e a matriz.

Na **quinagem no ar** o ângulo entre as abas da chapa a enformar é estabelecido pela penetração do punção na matriz (profundidade de quinagem), não sendo necessário substituir qualquer uma das ferramentas para obter diferentes ângulos de quinagem (Figura 9). Neste caso, as forças envolvidas são baixas, porém a precisão dimensional das peças é relativamente limitada, na medida em que a recuperação elástica que o material sofre após deformação plástica altera a geometria final da peça. Também a qualidade e o estado de conservação das ferramentas e da máquina-ferramenta influenciam a precisão dimensional das peças quinadas.

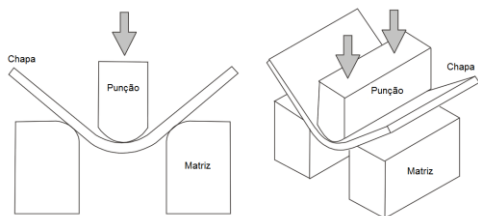


Figura 9 - Esquema de quinagem "no ar"
(www.ciri.org.nz/bendworks/bending.pdf)

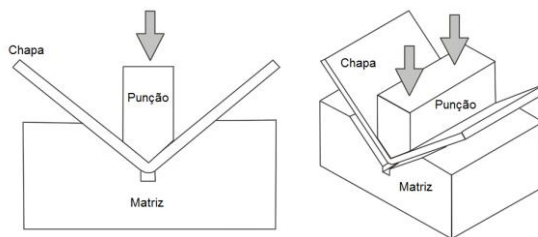


Figura 10 - Esquema de quinagem "em v"
(www.ciri.org.nz/bendworks/bending.pdf)

Na **quinagem em v** a chapa é deformada até encostar às ferramentas, sendo a folga entre o punção e a matriz constante e igual à espessura da chapa (Figura 10). A operação assim efetuada é mais precisa que a anterior e é usada fundamentalmente para quinar chapas com ângulos de 90° ou ligeiramente inferiores, com espessuras que podem variar entre os 0,5 e os 2,5 mm.

O processo de **quinagem em u** caracteriza-se por existirem dois eixos de dobragem paralelos (Figura 11). Em geral, efetua-se com um encostador que promove o contacto da chapa com a zona do fundo do punção, evitando, dessa forma, defeitos de uma peça enformada. Porém, este dispositivo exige um acréscimo de força de cerca de 30 a 40%.

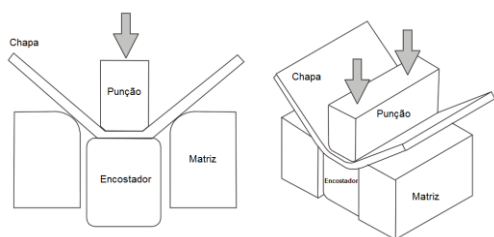


Figura 11 - Esquema de quinagem "em u"
(www.ciri.org.nz/bendworks/bending.pdf)

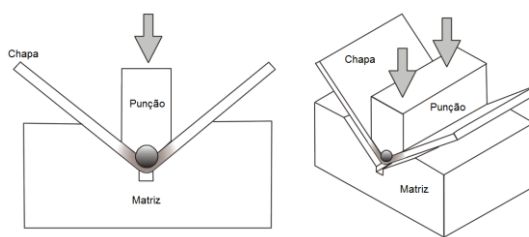


Figura 12 - Esquema de quinagem "a fundo"
(www.ciri.org.nz/bendworks/bending.pdf)

Na operação de **quinagem a fundo**, também designada em gíria oficial por **quinagem com quebra de nervo**, a chapa é esmagada entre o punção e a matriz no final da operação, de modo que a folga entre o punção e a matriz seja inferior à espessura da chapa (Figura 12). Esta técnica é sobretudo utilizada para chapas finas (com espessuras inferiores a 3 mm) e permite reduzir, ou mesmo eliminar, a recuperação elástica do material. Esta operação requer uma força consideravelmente superior à quinagem no ar, podendo o seu valor triplicar ou mesmo quintuplicar, devendo ser utilizada quando a precisão requerida for elevada ou para a obtenção de cantos muito vivos (pequenos raios de quinagem).

Comparando os processos de quinagem no ar e quinagem a fundo, deduzimos que o primeiro tem como vantagens o facto de poder ser efetuado com máquinas ferramenta de menor capacidade (uma vez que a força e a energia necessárias são mais reduzidas), apresentar menor desgaste das ferramentas, bem como perigo de inutilização das mesmas e a evidência de que o mesmo conjunto punção/matriz pode ser usado para efetuar dobragens com diferentes ângulos, reduzindo-se desta forma os custos de preparação e de montagem das ferramentas. Por outro lado, a quinagem a fundo permite a obtenção de peças mais precisas, podendo ser enformadas com raios de quinagem inferiores à espessura da chapa e leva à redução ou mesmo eliminação do fenómeno de recuperação elástica.

Na **quinagem de flanges com punção de arrasto** uma das abas da chapa é fixa por um encostador, enquanto a outra é dobrada a 90° pela ação do punção (Figura 13). Este processo tem a vantagem de permitir alterar com facilidade a dimensão da aba enformada, bem como a do respetivo ângulo de dobragem, através da variação do curso mínimo do punção.

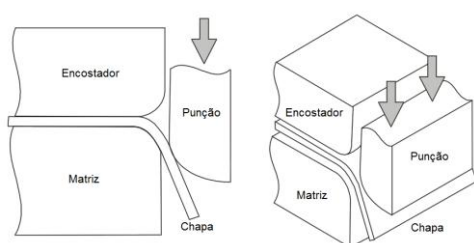


Figura 13 - Esquema da quinagem “de flanges com punção de arrasto” (www.ciri.org.nz/bendworks/bending.pdf)

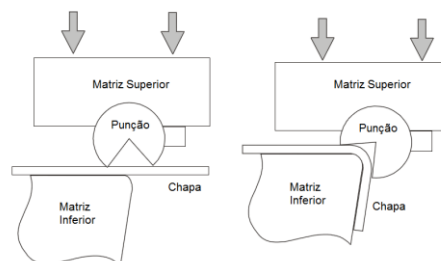


Figura 14 - Esquema da quinagem rotativa (www.ciri.org.nz/bendworks/bending.pdf)

Na **quinagem rotativa** recorre-se a uma matriz rotativa para enformar a chapa (Figura 14) pelo que, relativamente ao anterior processo, evidenciam-se as vantagens de não haver necessidade de se utilizar encostador, de se poder compensar o efeito de mola por diminuição do ângulo de dobragem e pelas forças requeridas pelo processo serem baixas [1].

2.2 Caracterização das quinadoras da ADIRA

A ADIRA conta com várias soluções de quinagem disponibilizando quatro gamas de quinadoras de base, passando por soluções customizadas e “chave-na-mão”.

A gama PM destina-se a aplicações com exigências de força e velocidade medianas. Esta gama resulta da implementação de soluções comprovadas ao longo dos anos pelo fabricante. Sendo a menos sofisticada tecnologicamente, tem um preço muito competitivo. Inclui três modelos *standard* de 135, 160 e 220 toneladas de capacidade de força com comprimentos de quinagem de 3 ou 4 metros.

Dotada de um sistema avançado de segurança por barreiras laser e de um sistema de “intermediários” com aperto rápido dos punções, torna mais simples a operação do equipamento e cumpre elevados requisitos de qualidade. O comando numérico de série é o Cybelec DNC 60 a três eixos. Uma quinadora desta gama está ilustrada na Figura 15.



Figura 15 - Quinadora ADIRA da gama PM (www.adira.pt)

A gama PA é bastante versátil, já que permite um grande leque de características optativas do equipamento. Desde o modelo PA 2512, de 25 toneladas de força e 1200 milímetros de comprimento de quinagem ao modelo PA 32040, de 320 toneladas por quatros metros, permite várias configurações possíveis ao nível do comprimento útil de trabalho e capacidade de carga. Inclui esbarros multi-eixos de nova geração.

Os comandos numéricos Cybelec disponíveis são o DNC 60 a três eixos ou o DNC 880 S a quatro eixos, bem como o modelo Modeva 10S ou 12S (3D) consoante a configuração do equipamento e a sua complexidade construtiva. Opcionalmente podem-se escolher braços de apoio frontal em carril e acompanhadores de quinagem. Pode-se visualizar uma quinadora desta gama na Figura 16.



Figura 16 - Quinadora ADIRA da gama PA (www.adira.pt)

As quinadoras da gama PF são consideradas como o topo de gama da ADIRA. Com configurações desde 60 toneladas de força por 2 metros de comprimento útil até 220 toneladas por 4 metros. Possibilitam elevadas velocidades de aproximação (170 – 220 mm/s), de quinagem (8 – 20 mm/s) e de retorno (170 – 240 mm/s), mudança de velocidade 2 mm acima da chapa e consideráveis curso de trabalho (40 mm) e abertura (630 mm, sem ferramentas).

Os comandos numéricos associados são igualmente evoluídos, incluindo funcionalidades como visionamento 3D ou interface *touch*, como o Cybelec Modeva 10S, ESA 550 ou o Delem 66T. Este é um equipamento de elevada precisão e alto rendimento, sendo por isso o mais indicado pelo fabricante para a integração em células robotizadas. Apresenta-se na Figura 17 uma quinadora desta gama.



Figura 17 – Quinadora ADIRA da gama PF (www.adira.pt)

A linha PH é destinada a trabalhos de grande porte, com máquinas de elevada capacidade de força (de 300 até 1600 toneladas) destinadas a operar com grandes

comprimentos de quinagem (de 4 a 9 metros). Para aumentar o comprimento de quinagem, é possível fazer arranjos de quinadoras em *tandem*.

Esta linha é “costumizável”, possibilitando a inclusão de cursos especiais, cavas especiais e outras alterações ao equipamento de série. As opções de comando numérico são as mesmas da gama PA. Na Figura 18 apresentam-se duas quinadoras desta gama com arranjo em *tandem*.



Figura 18 – Quinadoras ADIRA da gama PH, com arranjo em tandem (www.adira.pt)

Todas as máquinas incluem sistemas de segurança com feixes laser, de modo a salvaguardar o operador do equipamento, de acordo com as normas de segurança vigentes.

O equilíbrio do avental superior pode ser feito eletronicamente, permitindo assim quinagens descentradas, quinagem multiposto e quinagens cónicas, bem como a programação da velocidade de quinagem. No avental inferior há também a opção “mesa bombeada”, que permite uma compensação mecânica de deformação da mesa, de modo a garantir o paralelismo local entre punção e matriz ao longo de todo o comprimento de quinagem.

O fabricante recomenda para as células robotizadas as quinadoras da gama PF, ou da gama PA com uma configuração adequada. Estas têm que ser instaladas com um “extra”, que são as ligações elétricas e alterações ao quadro elétrico, necessárias à interligação com o robô. Neste caso dispensa-se o sistema de segurança do operador por feixes laser, já que o mesmo não vai estar na proximidade do equipamento, quando em funcionamento com o robô, estando a célula neste caso rodeada por barreiras de proteção.

2.3 Automatização do processo de quinagem

A automação industrial pode-se definir em linhas gerais como a aplicação de um conjunto de técnicas, equipamentos específicos e/ou *softwares* num determinado processo industrial ou máquina isolada, com o intuito de implementar o funcionamento automático do equipamento, ou com o mínimo de intervenção humana.

Visa maximizar a produção e aumentar a sua eficiência, o aumento da qualidade do produto e da relação custo-benefício do investimento, além da minimização do consumo de energia, de matérias-primas e da emissão de ruídos de qualquer espécie. Por outro lado, persegue a melhoria das condições de segurança, seja esta humana (substituição do homem em atividades de risco), material ou das informações referentes ao processo [5].

É essencial em tarefas que envolvam trabalhos duros, monótonos ou quando estes se realizam em ambientes potencialmente perigosos para o homem (na proximidade de chamas, em vulcões, centrais nucleares, operações subaquáticas, no espaço, etc.) ou quando estas operações exijam que se excedam as suas capacidades físicas (a nível de tamanho, peso, velocidade, resistência, etc.). A nível económico, a automação pode contribuir para melhorias a nível empresarial, social e mesmo nacional, quando aplicada em grande escala.

Por outro lado, tem como desvantagens o elevado custo inicial dos equipamentos, os eventuais custos de pesquisa e desenvolvimento e os limites tecnológicos, que impossibilitam a automação de todas as tarefas potencialmente desejáveis. Automatizar uma linha de produção ou mesmo uma fábrica inteira requer um investimento inicial elevado quando comparado com o custo do produto, embora esse custo se dilua progressivamente no fluxo de produção.

A nível social, o desemprego gerado pela automatização de processos ao nível dos operadores das máquinas continua a dividir opiniões; se este desemprego se torna tendencialmente permanente, ou se é uma oportunidade para o trabalhador ascender a cargos menos perigosos para a sua integridade física, potencialmente mais bem pagos, através da especialização na sua área, ou através das oportunidades criadas noutras áreas graças às melhorias económicas globais trazidas pela própria automação, esta é enfim uma questão controversa [6].

2.3.1 Motivações para automatizar o processo de quinagem

Enquanto máquinas de produção industrial, o princípio de funcionamento das quinadoras é conhecido há muitos anos. Existe uma relutância tradicional em torno da automatização do processo de quinagem, já que implica dotar as quinadoras, um recurso tecnológico algo limitado, de um sistema de automação avançado.

Para além disso, há a noção de que a automatização da produção com quinadoras é mais difícil e dispendiosa, quando comparado com outros equipamentos de maquinagem, tanto em equipamento como em espaço. Automatizar implica geralmente um grande esforço de programação, havendo dificuldade em garantir a qualidade inicial das peças produzidas.

No entanto, a opção de automatizar pode ser fundamentada através de dez razões simples:

Fluxo de produção / Retorno do investimento: Uma célula automatizada garante um fluxo de produção constante com funcionamento potencialmente ininterrupto, minimizando o tempo necessário ao retorno do investimento inicial;

Atratividade da função: Muitas empresas sentem dificuldades em empregar trabalhadores que desempenhem funções de alimentação/extração de peças em máquinas, sendo a remuneração nestes postos frequentemente mais elevada;

Segurança do operador: Os robôs não sentem cansaço nem lesões, nem estão sujeitos a perderem a paciência com o seu trabalho, não sendo assim tão suscetíveis a acidentes de trabalho e incumprimentos de regras de segurança;

Qualidade do produto: A automação pode aumentar a qualidade do processo em vários aspetos, além de eliminar virtualmente peças que vão para a sucata por esquecimento, mau posicionamento, mau processamento etc;

Controlo de processo: O aumento da homogeneidade dos produtos é devido ao forte controlo do processo, de modo a que os produtos sejam todos iguais;

Utilização: A automação pode aumentar a utilização do equipamento até aos 90% do tempo disponível, sendo que a maioria das células não automatizadas operam

em torno dos 65% de utilização, devido ao cansaço do operador, pausas no trabalho, mudanças de turno, doença, etc;

Flexibilidade: A robótica permite uma resposta mais rápida às exigências do mercado. A simplicidade e flexibilidade dos softwares de programação *off-line* simplifica a criação/escrita e teste da programação para a quinadora e robô, os testes e ajustes iniciais dos novos programas fazem-se também mais depressa, da mesma forma que o início da produção propriamente dita;

Previsibilidade: Um processo controlado permite calendarizações previsíveis da produção e manutenção. Reduzem-se drasticamente as onerosas alterações ao planeamento da produção e manutenção não prevista;

Fiabilidade: O uso de robôs altamente fiáveis em células de quinagem aumenta o tempo de atividade (*uptime*) da produção;

Competitividade global: É consensual que a robótica reduz os custos unitários de produção, aumentando a competitividade da empresa [7].

2.3.2 A robótica na automatização do processo de quinagem

Neste contexto, faz-se uma análise sumária à adequabilidade dos robôs industriais no processo da quinagem. Nas tarefas de manipulação de materiais em ambiente industrial, os robôs mais utilizados são os de estrutura antropomórfica. Esta analogia na designação advém das semelhanças visuais e funcionais do braço, antebraço e pulso humanos com os elos e juntas do robô, desde a base até à sua extremidade, quando em cadeia aberta.

A preferência por este tipo de robôs industriais é devida a sua versatilidade, pois dentro dum espaço compacto estes possibilitam um maior número de movimentos.

A quinagem é associada na maior parte dos casos a pequenos lotes de produção, que ora envolvem peças complexas de grande dimensão com múltiplas etapas de quinagem, ora envolvem peças demasiado pequenas para serem manipuladas por um robô convencional.

As operações de alimentação de chapa, da paleta de entrada para a quinadora, têm que ser realizadas individualmente, do mesmo modo que a extração de peças após quinagem e seu acondicionamento na paleta de saída. Estas duas operações são lentas, realizadas por operadores sempre expostos a riscos potenciais de acidentes devidos a falhas humanas ou mecânicas.

Até há bem pouco tempo, a opção da integração da robótica em processos de fabrico estava apenas disponível para aqueles que trabalhassem com lotes de grande dimensão, da ordem do milhar ou mesmo das dezenas de milhar de peças, tipicamente associados à produção em massa, ou por lotes (Figura 19).

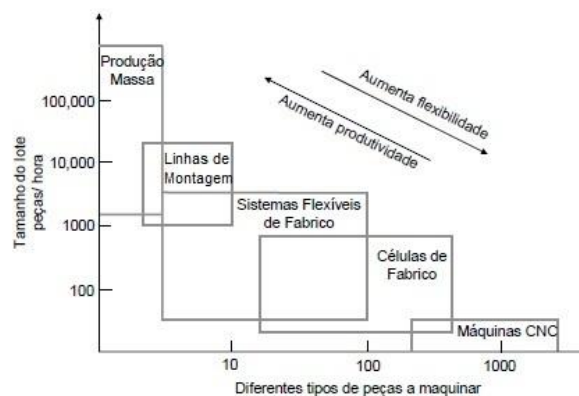


Figura 19 - Enquadramento da produção com células de quinagem

Os robôs industriais manipuladores apresentam no geral uma boa repetibilidade e precisão, no entanto acarretam também tempos de *setup* bastante consideráveis. Além disso, obrigam a parar a produção enquanto se faz a programação e ensino “manual” dos mesmos, sendo o cenário dos lotes de grande dimensão o único vantajoso para a sua utilização.

A programação rápida de robôs vem alterar esse dogma, mais do que a evolução das capacidades de “trabalho” dos próprios robôs. De facto, num sistema de produção flexível típico, o tempo de *setup* dos equipamentos tem um grande peso no custo final dos produtos, havendo todo o interesse em reduzir os tempos de programação ao mínimo, de modo a não interromper a produção [8].

2.3.3 Células robotizadas

Uma célula de produção robotizada é normalmente constituída por uma série de componentes principais. Além do robô e do seu elemento terminal (tipicamente uma garra, *gripper* mecânico, pneumático, magnético ou ferramenta) e o controlador, há que considerar também os sistemas de alimentação e remoção de produtos, máquinas-ferramenta CNC, os sistemas de posicionamento de produtos (mesas posicionadoras), os sistemas de segurança da célula e o sistema de controlo global de toda a célula.

Poderá existir mais do que um robô por célula, conforme o exemplo da Figura 20, e também outros sistemas auxiliares, tais como sistemas de mudança automática e/ou de limpeza de ferramentas (tocha de soldadura, por exemplo), *buffers* ou outros.

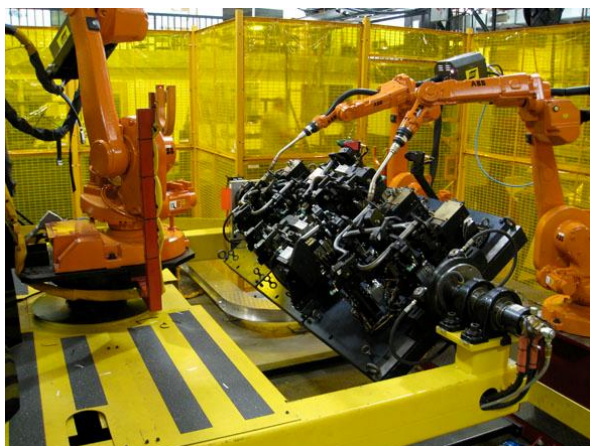


Figura 20 – Célula de soldadura robotizada ABB com 3 robôs
(<http://www.automationig.com/page/media/>)

Os elementos constituintes das células robotizadas devem ser dispostos espacialmente de forma cuidada, de modo a cumprir os objetivos globais do modo mais conveniente (como por exemplo, reduzir os tempos de ciclo). Este planeamento pode ser realizado recorrendo a ferramentas de CAD correntes, ou mesmo a softwares de simulação robótica, com capacidade para verificar alcances e colisões, ou mesmo calcular tempos de ciclo.

As configurações com o robô fixo no centro da célula de trabalho são bastante usuais, no sentido do aproveitamento máximo do volume de trabalho do robô. Esta lógica é seguida também nas células de quinagem, conforme abordado no ponto seguinte. Este tipo de configurações é típico nas operações de carga/descarga, soldadura, paletização ou montagem, sendo que os robôs mais indicados são os de

estrutura antropomórfica, *SCARA*, polar e cilíndrica. A fixação do robô pode ser feita no solo, num pedestal, por suspensão em pórtico ou numa parede ou estrutura vertical. Para maximizar o volume de trabalho disponível de um dado robô pode-se acoplá-lo a um eixo excêntrico auxiliar ou proceder a uma montagem em carril (robô móvel) [9].

2.3.4 Células de quinagem robotizadas

Uma célula de quinagem robotizada obtém-se, de uma forma simplista, por substituição do operador de uma quinadora CNC por um robô manipulador, conforme sugerido na Figura 21. Esta é uma forma de tirar os operadores da zona de maior risco para a sua integridade física, ao mesmo tempo que se potencia a produção, conforme referido no ponto 2.3.1.

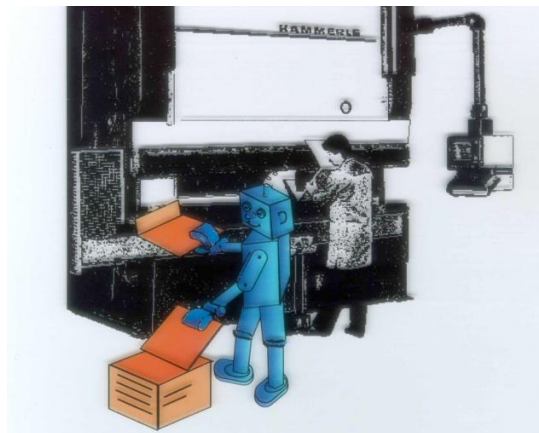


Figura 21– Alusão à substituição de operadores humanos por robôs
(www.mcgs.ch/web-content/Robotics.pdf)

Sempre que se quer iniciar a produção de uma peça com uma quinadora CNC, é necessário fazer a preparação (ou *setup*) do equipamento, o que inclui, entre outras tarefas, a programação da quinadora e a mudança das ferramentas a utilizar.

A programação da quinadora pode ser realizada manualmente através da consola de programação, ou recorrendo a softwares de programação específica do controlo numérico utilizado, com posterior transferência dos ficheiros gerados por rede de comunicação interna ou disco *USB*.

As ferramentas da quinadora (punções e matrizes) designados para a obtenção das quinagens pretendidas são normalmente instalados na quinadora de forma manual.

No entanto, existem também sistemas de mudança automática, com recurso a armazéns de ferramentas e engates próprios para a manipulação das mesmas.

Quando operada manualmente, fica a cargo do operador a “alimentação” da quinadora com chapas provenientes de uma paleta ou tapete alimentador, bem como a deposição dos produtos acabados numa paleta de saída antes de iniciar um novo ciclo. Antes de cada quinagem, o operador orienta e posiciona manualmente a chapa contra esbarros montados dentro da quinadora. Esta é mantida em posição com as suas mãos durante as operações. A descida e subida do avental são comandados por pedais.

Do ponto de vista funcional, o robô irá realizar as mesmas operações que um operador humano, no que diz respeito ao manuseamento de chapas durante a sequência de quinagem, alimentação da quinadora e paletização dos produtos acabados, possivelmente auxiliado por outros sistemas automáticos. Com um robô, os comandos para a quinadora CNC são enviados por sinais elétricos, em vez dos tradicionais botões e pedais. Da mesma forma, os sentidos com que o operador humano recebe informação da quinadora, nomeadamente a visão, o tato e audição, são também substituídos por sinais elétricos.

Por outras palavras, o “interface homem-máquina” (HMI) clássico é substituído pelo arranjo direto dos sinais de I/Os do robô com a quinadora e outro eventual equipamento adjacente.

A Figura 22 contém uma solução comercial de célula de quinagem Motoman, onde se podem identificar os elementos típicos de equipamentos deste género:

- 1 – Robô industrial Motoman UP50 (manipula cargas até 50 kg)
- 2 – Controlador do robô
- 3 – Paleta “de entrada” de chapa
- 4 – Mesa de referência (“esquadro”)
- 5 – Posto de mudança de fixação
- 6 – Quinadora CNC
- 7 – Paleta “de saída” dos produtos
- 8 – Portas de acesso à célula
- 9 – Operador e consola do robô

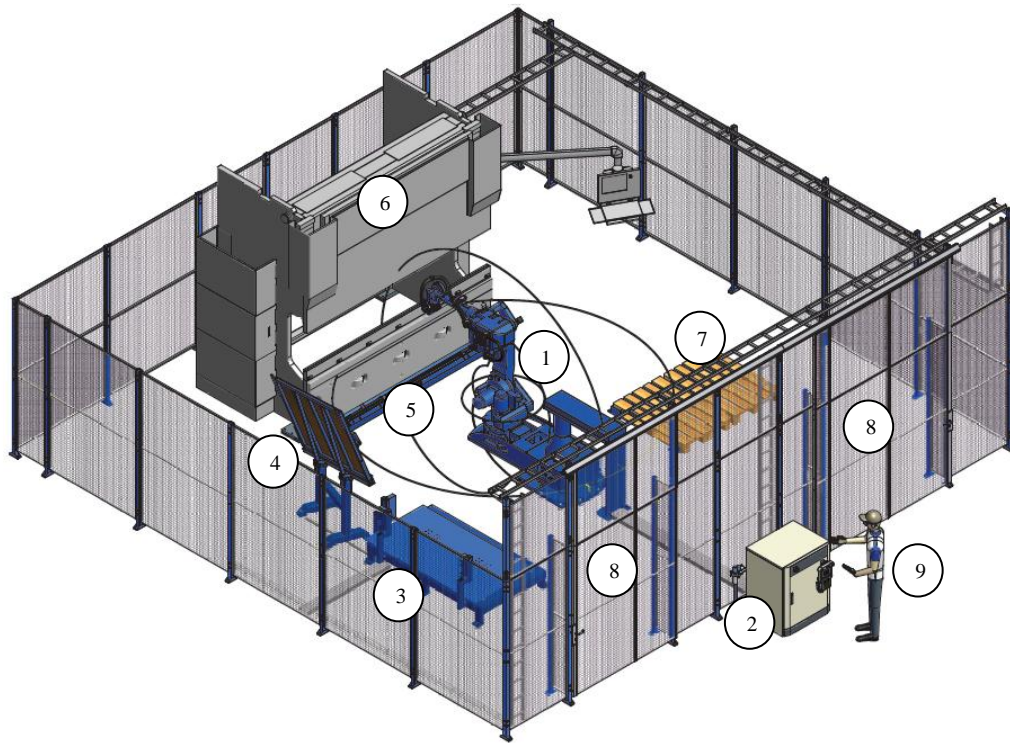


Figura 22 – Exemplo de célula de quinagem Motoman
(http://www.motoman.eu/uploads/tx_catalogbasic/PB-UP50N.pdf)

Uma solução deste tipo, em que o mesmo robô executa tanto a alimentação de chapa para a quinadora como a paletização, uma vez terminado o ciclo, tem o seu funcionamento ilustrado na Figura 23, com as seguintes etapas:

- 1 - O robô “pega” numa chapa na paleta de entrada
- 2 - A peça é posicionada por gravidade contra os batentes na mesa de referência
- 3 - O robô “leva” a peça à quinadora e a sequência de quinagem tem início
- 4 - Mudança de fixação eventual no decorrer da sequência de quinagem
- 5 - Peça completa depositada na paleta/tapete de saída

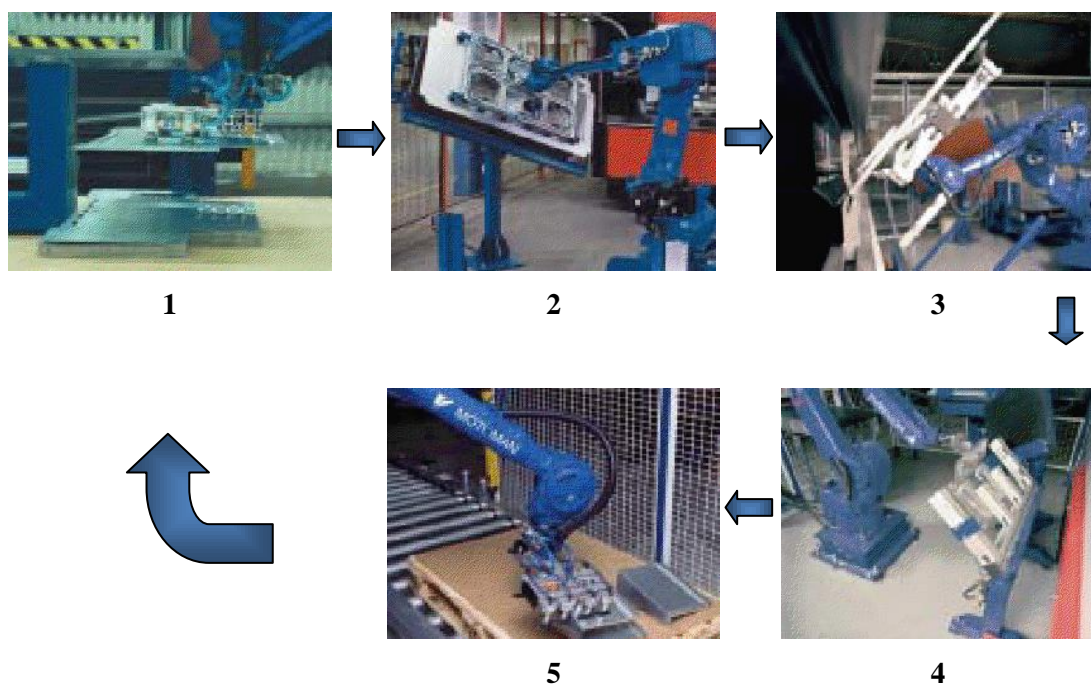


Figura 23 – Etapas da quinagem assistida por robô
(http://www.motoman.dk/uploads/media/Pressbrake_en_02.pdf)

Dependendo do grau de automação implementado, podem existir sistemas de troca automática de ferramentas do robô (*grippers*) e da quinadora (punções e matrizes), o que implicaria o aparecimento dos armazéns destas ferramentas dentro da célula.

Estas operações podem ser efetuadas com recurso a soluções dedicadas ou pelo próprio robô, no sentido de minimizar o tempo de paragem da produção, quando comparado com uma troca de ferramentas realizada manualmente. Numa célula robótica com grandes requisitos de flexibilidade, estes engates rápidos permitem a realização de várias tarefas com trocas expeditas de ferramentas. Num cenário de produção por lotes, obtêm-se ganhos evidentes na redução do tempo de *setup* compreendido na troca de *grippers*. No caso de uma dada ferramenta precisar de manutenção ou reparação, há a possibilidade de se ter uma segunda ferramenta idêntica disponível, sem necessitar calibração.

As soluções de acoplamentos das ferramentas do robô por engates rápidos, caracterizam-se por terem elevada rigidez, precisão no posicionamento e pela disponibilização de saídas hidráulicas/pneumáticas e elétricas. Nas Figuras 24 e 25 apresenta-se um exemplo de solução deste tipo.



Figura 24 - Discos “master” e “tool”, produto comercial da empresa de automação ATI (<http://www.robots.com/images/blog/ati.jpg>)



Figura 25 - Robô FANUC com sistema de troca rápida de ferramentas ATI (http://www.robots.com/images/blog/dsc_0028-02-01-2010.jpg)

Na Tabela 1 é apresentada uma listagem de algumas soluções existentes no mercado de engates rápidos passíveis de serem incorporados em células robotizadas como sistemas de troca automática de ferramentas.

“ENGATES RÁPIDOS” PARA SISTEMAS DE TROCA AUTOMÁTICA DE FERRAMENTAS DO ROBÔ	
Empresa	Modelo
ATI - www.ati-ia.com	QC
RAD - www.rad-ra.com	TC
DE-STA-CO - www.destaco.com	RQC/RTP
SCHUNK - www.schunk.com	SWS
IPR - www.iprautomation.com	TK

Tabela 1– Exemplos de algumas soluções de engates rápidos para sistemas de troca automática de ferramentas do robô

Quanto à troca automática de ferramentas da quinadora, a marca de ferramentas WILA disponibiliza uma solução com “engates” nas ferramentas (conforme visível na Figura 26) passíveis de serem manipuladas pelo robô com um *gripper* dedicado, com peso admissível da ferramenta até 15 Kg.



Figura 26 – Sistema ATC da marca de ferramentas WILA
(<http://www.wila.nl/Tooling-Gripper.aspx?GB-1-19-157-0-0>)

Existem soluções dedicadas de automatização da troca de ferramentas da quinadora de alguns fabricantes de quinadoras. Na Tabela 2 estão listados esses modelos, em que a troca automática de ferramentas surge como parte integrante das suas soluções comerciais de quinagem automatizada/robotizada.

SISTEMAS DE TROCA AUTOMÁTICA DE PUNÇÕES E MATRIZES EM QUINADORAS		
Empresa	Modelo	Descrição
FINN-POWER www.finn-power.com	TheBEND	Solução dedicada para troca de punções
Trumpf www.trumpf.com	TrueBend/ToolShuttle	<i>Shuttle</i> p/ punções e matrizes
GWF MENGELE www.gwf-mengele.de	Twister	Sistema tipo carrossel - até 6 matrizes
AMADA www.amada.com	Astro Cell II	<i>Shuttle</i> p/ punções e matrizes

Tabela 2 – Fabricantes com soluções de troca automática de punções e matrizes

Entre as soluções de células de quinagem robotizadas disponíveis no mercado, há que distinguir entre as soluções dos chamados “integradores de sistemas” (*system*

integrators) e os produtos dedicados de uma marca, construídos de raiz. Na Tabela 3 são mostrados alguns exemplos de células de quinagem dos dois tipos mencionados.

CÉLULAS DE QUINAGEM ROBOTIZADAS DISPONÍVEIS NO MERCADO			
TECNOLOGIA DEDICADA, “DE MARCA”			
Empresa		Modelo	
Trumpf – www.trumpf.com		TruBend	
Safan – ww.safa.nl		I-Brake	
AMADA – www.amada.com		Astro Cell	
“INTEGRADORES DE SISTEMAS”			
Empresa	Modelo	Quinadora	Robô
LVD www.lvdgroup.com	RoboCell	LVD PPEB/EasyForm	KUKA
Schiavi www.schiavimacchine.it	-	Hfb	COMAU
REA Robotics www.reagroup.it	-	-	ABB
HACO - Robosoft www.haco.com	Compact Bending Cell	HACO	Staubli / MOTOMAN

Tabela 3 – Exemplos de algumas soluções de engates rápidos para sistemas de troca automática de ferramentas do robô

No caso dos “integradores de sistemas”, as células de quinagem resultam da adição de sistemas de automação ao produto-base, que é uma quinadora CNC de elevado desempenho. O contrário também pode suceder, com um fabricante de soluções robóticas a incorporar uma quinadora para poder fornecer uma célula completa. Na Figura 27 pode ver-se uma célula de quinagem LVD, com a integração de um robô KUKA.



Figura 27 – Célula de quinagem LVD, com um robô KUKA
(<http://www.lvdgroup.com/pictures/products/633456609708568750.jpg>)

Alguns fabricantes de quinadoras apresentam as suas próprias soluções de automação para a manipulação de chapas e peças. Nestes casos a célula é concebida como um todo, com a inclusão de braços robóticos “na quinadora” ou com a inclusão de sistemas (robóticos e/ou outros) dedicados. A Figura 28 mostra uma solução comercial deste tipo, da empresa LVD.



Figura 28 – Célula de quinagem SAFAN I-Brake
(http://www.safan.nl/index.php?page_id=31&l=2)

2.4 Pontos críticos da mudança de *setup* em células de quinagem

Uma célula de quinagem faz uso da flexibilidade típica dos sistemas de produção flexível (FMS), pelo que torna possível a produção de um elevado número de produtos com alguma variedade, utilizando o mesmo equipamento.

Foram identificados os pontos críticos de uma mudança de referência, ou os maiores consumidores de tempo quando se quer reprogramar a célula para produzir uma nova peça (mudança de *setup*):

- Programação do robô
- Programação da quinadora
- Mudança de ferramentas da quinadora (posicionamento e "ajuste")
- Mudança das ferramentas do robô
- Programação do processo de paletização de peças

No sentido de agilizar uma mudança de referência, ou o ensino rápido de células de quinagem, sentiu-se a necessidade de avaliar a importância de cada um dos pontos críticos no tempo de *setup* da célula.

Para avaliar o peso que a programação *off-line* terá nos tempos de *setup* da célula, não basta compará-los apenas com os tempos atuais de programação, também é necessário determinar o peso relativo que a programação do robô/quinadora têm no tempo total de *setup* da célula (quer em modo *off-line* quer em modo *online*).

Por outro lado, a avaliação do segmento de mercado onde se situam os clientes das células de quinagem ADIRA é crucial para a definição do software de programação *off-line* como uma necessidade para os mesmos. A interrupção da produção numa célula para a realização do *setup* é obviamente necessária para uma mudança de referência, mas não acrescenta propriamente valor ao produto.

Quer-se que este tempo de paragem seja o mais curto possível, relativamente à quantidade de produtos produzidos com esse mesmo *setup*. Logicamente, quanto mais frequentes forem os novos *setups* maior será a necessidade de os agilizar.

Ainda assim, a programação *off-line* será tão mais vantajosa quanto maior for a quantidade e complexidade das operações de quinagem por peça (que acarretam um

tempo de *setup* maior) e, essencialmente, quanto menor for o tamanho do lote do produto em questão (haverá menos tempo para diluir o tempo de *setup* da célula na produção do lote). A Figura 29 representa esta ideia, através de uma matriz de duas entradas.

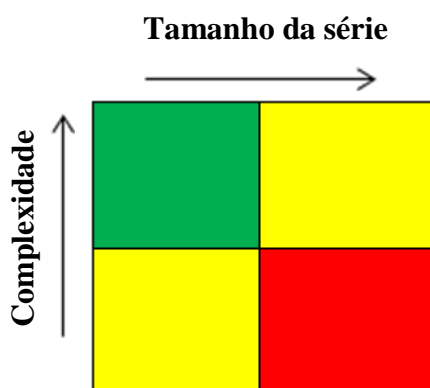


Figura 29 - Aplicabilidade de softwares de programação *off-line* em células de quinagem

Estas noções têm como base a experiência do fabricante em lidar com clientes e seus objetivos, no entanto sentiu-se a necessidade de confirmá-las com dados concretos da indústria de fabrico.

Neste sentido elaborou-se um questionário (em anexo) e enviou-se a clientes da ADIRA que possuem atualmente células de quinagem. Este questionário visa a objetividade e a resposta rápida (não mais do que 3 ou 4 minutos), foi realizado em formato de documento escrito e questionário *online*, conforme as conveniências de resposta dos clientes.

Foram pedidas informações relativas ao tamanho das séries e à complexidade das peças produzidas, como o número de quinagens e de secções de peça, ângulos mais habituais, mudanças de fixação (*regrip*) e existência de quinagens especiais. Não foram requisitados desenhos nem cotagens, de modo a proteger a propriedade industrial dos clientes e para salvaguardar a clareza na interpretação dos resultados.

Pediu-se uma estimativa do tempo consumido em cada um dos já referidos pontos críticos de uma mudança de referência, bem como o grau de importância atribuído a cada um deles.

Por último pediram-se algumas sugestões com vista à melhoria do funcionamento das células de quinagem, ao nível da programação da quinadora e do robô, dos dispositivos da célula ou outras eventuais sugestões.

Poder-se-á assim concluir quanto ao peso do *setup* das máquinas com os métodos de programação atuais e os ganhos esperados em tempo de *setup* com a evolução para os métodos de programação *online*, por comparação entre os tempos atuais dos clientes e os tempos obtidos com a programação *off-line*, com confirmação real numa célula de fabrico na ADIRA.

A partir do número de respostas recebidas, não foi possível inferir a informação desejada com a elaboração deste questionário. No entanto, tem-se a opinião de que o software de programação *off-line* trará grandes melhorias no tempo de *setup* de células de quinagem, nomeadamente a nível da programação do robô e quinadora e da programação do processo de paletização de peças, e eventualmente na mudança das ferramentas do equipamento.

3. Programação *off-line* de células de quinagem

O controlo total de uma célula de produção automatizada envolve a sincronização de tarefas, aplicável a todos os robôs e restante equipamento interveniente no funcionamento da célula.

Segundo os métodos de programação *online* tradicionais, todos os equipamentos são programados independentemente, de acordo com a hierarquia de controlo global do sistema. Os grandes inconvenientes deste método são as possíveis colisões entre o robô e o programador e o facto de a produção na célula ter que parar forçosamente durante a programação e eventuais ajustes. Assim surgiram os softwares de programação *off-line* de robôs, de modo a se poder minimizar o tempo de paragem destes e, consequentemente, da célula de produção, ao mesmo tempo que se melhoram as condições de segurança no manuseamento do equipamento.

O caso ideal seria o de transferir para o controlador do robô um programa gerado usando um software *off-line*, e que o mesmo fosse executado sem alterações. Cada tarefa poderia ser testada pelo software, englobando a realização da simulação gráfica antes da execução do programa e toda a sincronização de sinais entre o equipamento e a programação de cada robô, permitindo otimizar a sequência de execução da tarefa e mesmo tirar ilações sobre a disposição dos componentes na célula. Tudo isto anteriormente ao ensaio físico da tarefa na célula. Após a fase de simulação, os programas seriam descarregados do computador para a célula de produção e testados. Analogamente, possibilitaria também o processo inverso, transferindo programas já executados pela célula para o computador, com vista à sua simulação e edição (Carvalho et al., 1998).

No entanto, existem diferenças inevitáveis entre o modelo computadorizado usado para a simulação gráfica e o mundo real. Assim, o uso efetivo de programação *off-line* em robôs industriais depende do conhecimento das tolerâncias de fabrico dos componentes e posicionamento relativo, de modo a que, com um planeamento realista, se minimize a distância entre simulação e a realidade. A utilização de controladores virtuais na simulação *off-line* com cálculos da mesma ordem dos controladores reais foi um passo dado neste sentido.

A nível de preço, há uma grande diferença entre os sistemas simples de programação *online* e os recentes sistemas onerosos de programação e simulação *off-line*. Os sistemas *online* permitem a edição ou o arquivo de programas já existentes e são usados para desenvolver a estrutura do programa, normalmente através da definição das posições e orientações do elemento terminal do robô e da sua dinâmica, enquanto que os sistemas *off-line*, de manuseamento interativo, permitem que seja feita a descrição do trajeto nominal no sistema de coordenadas-base do robô.

Num sistema robotizado atual, este tipo de programação ainda é uma tarefa relativamente difícil de se materializar convenientemente sem uma programação *online* posterior aquando dos ensaios físicos. A título de exemplo, uma linha típica de soldadura com 30 robots e 40 pontos de soldadura por robô requer cerca de 400 horas para se fazer o “ensino” manual (Bernhardt, 1997).

Entre as dificuldades existentes assinalam-se a determinação de como é que o robô pode desempenhar corretamente a sua função, mas também se ele será capaz de atingir com exatidão as localizações desejadas no espaço de trabalho. Os erros de posição dos robôs são atribuídos a várias origens, incluindo os erros constantes (ou independentes das configurações), em parâmetros (longas cadeias cinemáticas, desvio de juntas), desvios que variam previsivelmente com a posição (elasticidade, erros de transmissão de engrenamentos) e erros aleatórios (devido à resolução finita dos *encoders* das juntas, por exemplo) [10].

3.1 Programação de robôs

A programação de um robô envolve a especificação de um conjunto de pontos no espaço que devem ser visitados, sendo eventualmente definidas as trajetórias - lineares ou circulares - e velocidades de movimentação entre os pontos especificados. Envolve também a definição da interação dos movimentos do robô com outros equipamentos através da existência de capacidades sensoriais e da possibilidade de modificação da execução do programa.

Existem duas formas distintas de se programar um robô: “ensinando-o” ativa ou passivamente (programação *online*), o que implica que o programador “use”

diretamente o robô, ou através da utilização de software de simulação do robô e do ambiente de trabalho (programação *off-line*).

A programação por guiamento ou aprendizagem requer a movimentação do robô de uma forma passiva (o robô é fisicamente arrastado ao longo dos movimentos pretendidos) e, em simultâneo, são memorizados os movimentos do robô para posterior repetição automática. Este método de programação pode ser realizado de forma direta (Figura 31) ou indireta (Figura 30), sendo muito utilizado em robôs de pintura e revestimento.

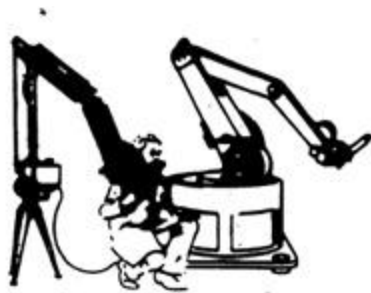


Figura 30 – Programação de robô por guiamento, de forma indireta

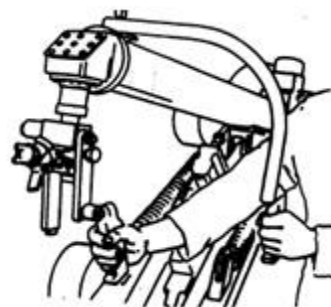


Figura 31 – Programação de robô por guiamento, de forma direta

A programação por meio de uma consola de programação leva também à movimentação do robô de uma forma ativa, em que o mesmo é movimentado para os pontos de interesse, sendo estes então memorizados (Figura 32). O processo de programação é complementado por uma programação textual onde é definido o tipo de movimento a utilizar, o tipo de interpolação a implementar entre os pontos ensinados, as velocidades pretendidas e toda a interação necessária para acomodar a realização das tarefas a programar.



Figura 32 – Programação de robô através de consola
(http://www.motoman.dk/uploads/media/Pressbrake_en_02.pdf)



Figura 33 – Programação de robô através de software *offline*
(http://www.motoman.dk/uploads/media/Pressbrake_en_02.pdf)

A programação *off-line* de robôs não implica o uso direto do robô durante a fase de programação (num caso ideal), pelo que grande parte do programa pode ser desenvolvido paralelamente ao funcionamento do robô com um outro programa.

Este tipo de programação faz uso de software específico para escrever linhas de comando do programa, escrita diretamente na linguagem do robô. No entanto, a verificação da exequibilidade do programa e deteção de erros carece de uma confirmação visual, havendo assim a necessidade de testar o programa num robô/célula de fabrico real (simulação *online*). A inclusão de ferramentas de simulação gráfica do robô e ambiente de trabalho permitem realizar um passo intermédio no teste do programa, por visualização das trajetórias geradas, conforme o exemplo da Figura 33. Quando mais robusta for esta simulação menor será a probabilidade de ocorrência de erros aquando da transferência do programa para o controlador do robô real.

Assim, a programação *off-line* envolve a modelização do robô, do ambiente de trabalho e das peças e a utilização de uma linguagem de programação própria do sistema de simulação ou, eventualmente, idêntica à do robô em uso. Segue ainda procedimentos similares aos utilizados em programação *online* com linguagens a nível do robô. As etapas na programação *off-line* seguem a sequência descrita na Figura 34 [9]

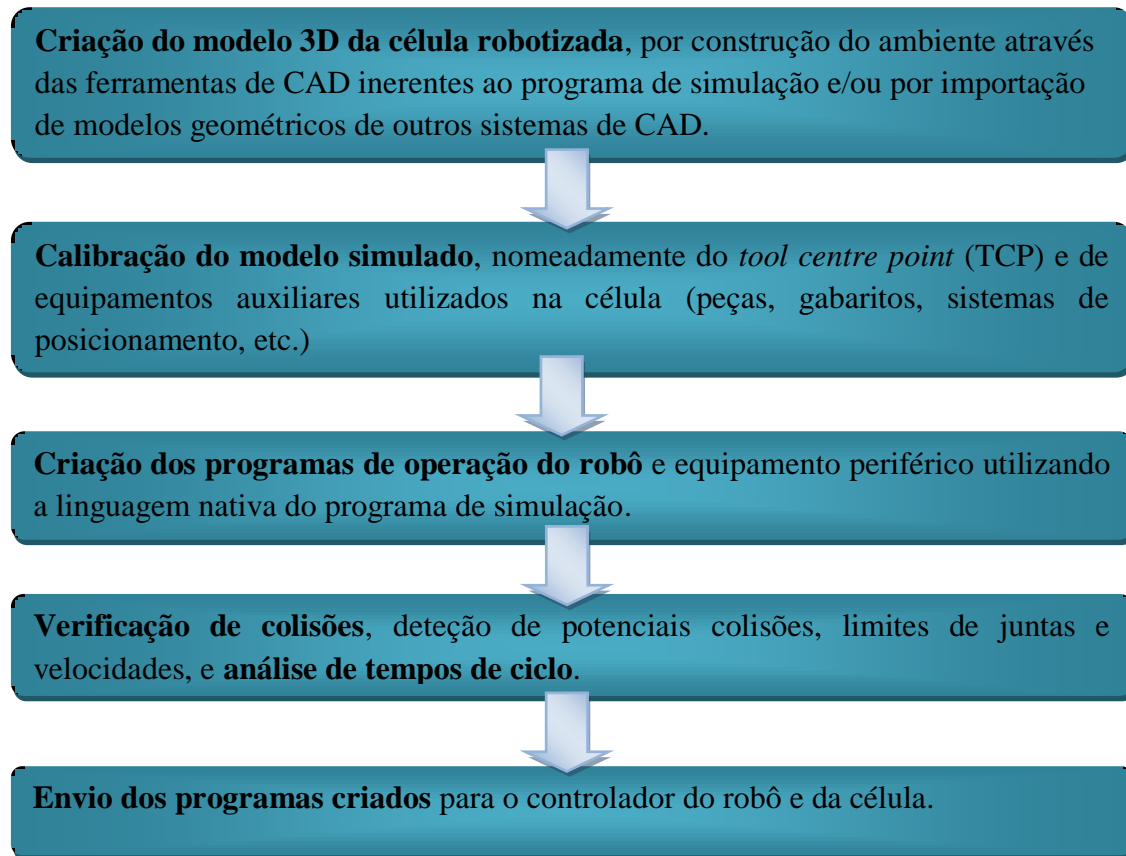


Figura 34 – Sequência de tarefas compreendidas na utilização de softwares de programação off-line de robôs

3.2 Softwares de simulação *off-line* existentes

Entre as funcionalidades disponíveis em softwares de simulação, podem salientar-se como as mais relevantes a simulação e animação de células robotizadas com vista à otimização da programação do robô e da célula, com consequente exportação do programa gerado na linguagem do robô.

A modelização 3D de robôs, de ferramentas e outros objetos é obtida por interfaces com sistemas de CAD, ou até pelo próprio sistema de CAD do software de programação. Alguns programas disponibilizam bibliotecas de modelos físicos de robôs comerciais e outro equipamento corrente na automação de células de fabrico.

A componente de simulação é suportada pela geração automática da cinemática e dinâmica de robôs, calibração de robôs e células de trabalho, detecção automática de

colisões e ainda a estimação e análise de tempos de ciclo. A programação do robô é gerada numa das linguagens de programação disponíveis na biblioteca, salvo no caso de ser software proprietário de uma marca.

3.2.1 Softwares de simulação/programação genéricos

Entende-se por “software de simulação/programação genérico” uma ferramenta sem uma aplicação industrial específica definida (como soldadura, pintura, paletização ou maquinagem). Para aplicações concretas existem extensões dos programas (*add-ons*) com interfaces mais intuitivas para o utilizador poder simular concretamente a aplicação em questão, embora seja possível simular os mesmos processos com o software-base.

Existem vários programas deste tipo que foram desenvolvidos para a programação de robôs de vários fabricantes, ditos “softwares independentes”, enquanto outros são fornecidos pelos fabricantes para a programação dos seus robôs, ditos “softwares proprietários”. Apresenta-se na Tabela 4 uma listagem de algumas soluções independentes de softwares genéricos de programação.

SOFTWARES INDEPENDENTES DE SIMULAÇÃO/PROGRAMAÇÃO GENÉRICOS	
Empresa	Software
WAT SOLUTIONS www.watsolutions.com	Workspace5
COSIMIR www.motionshop.com/pr/festocosimir.shtml	-
ERXA www.erxa.it	Robowave
Compucraft Ltd www.compucraftltd.com	RobotWorks/SolidWorks
EASY-ROB www.easy-rob.de	-

Tabela 4 – Exemplos de softwares independentes para simulação/programação *off-line* de robôs de vários fabricantes

Na Tabela 5 é apresentada de forma análoga uma listagem de soluções de softwares proprietários genéricos de programação.

SOFTWARES PROPRIETÁRIOS DE SIMULAÇÃO E PROGRAMAÇÃO GENÉRICOS	
Empresa	Software
Motoman www.motoman.com	MotoSim EG
ABB www.abb.com	RobotStudio
Kuka www.kuka.com	KUKA SIM
Fanuc www.fanucrobotics.com	ROBOGUIDE
Panasonic www.panasonicfa.com	DTPS
Kawasaki www.kawasakirobotics.com	PC-ROSET
Reis www.reisrobotics.de	ProSim
DENSO www.densorobotics.com	WINCAPS III
IGM www.igm-group.com	-

Tabela 5 – Exemplos de softwares proprietários de fabricantes de robôs para simulação e programação *off-line*

Entre as funcionalidades típicas destes softwares pode-se enumerar as seguintes:

- **modelação de objetos** da célula virtual, por importação de formatos neutros de CAD ou criação e edição de modelos com a ferramenta de CAD do software, com vista à modelação do *layout* da célula virtual.
- **organização de objetos** modelados **em bibliotecas**, possibilitando um acesso rápido a modelos para incorporação na simulação
- **geração** automática ou assistida **de trajetórias do robô**, com verificação de acessibilidades do TCP do robô

- **simulação gráfica tridimensional de processos**, baseada em motores de simulação dinâmicos ou cinemáticos do equipamento robótico
- **exportação da programação** gerada na simulação diretamente **para o(s) robô(s)** e/ou outros equipamentos de controlo numérico, através de pós-processamento do código obtido pelo software para a linguagem do equipamento

3.2.2 Soluções integradas para quinagem

Em relação aos softwares abordados no ponto anterior, estas soluções apresentam interfaces e funcionalidades orientados para a quinagem de chapa metálica, de fácil interpretação para utilizadores que não tenham grandes conhecimentos em automação ou robótica. A tarefa de programar o robô para a simulação, já de si simplificada pelo interface gráfico, pode ser realizada automaticamente pelo simulador, com posteriores alterações do utilizador. A inclusão de algoritmos de cálculo para tarefas específicas da quinagem de chapa metálica, como a definição da sequência de quinagem, seleção de ferramentas ou o posicionamento dos *grippers*, permitem avaliar todo o processo num mesmo programa.

Os *softwares* identificados como de “simulação e programação”, dedicados para operações de quinagem, estão listados na Tabela 6.

SOFTWARES DE SIMULAÇÃO E PROGRAMAÇÃO DEDICADOS PARA QUINAGEM	
Empresa	Software
KUKA www.kuka.com	KUKA BENDTECH PRO
ABB www.abb.com	Robotstudio + Bending Power Pack
ERXA www.erxa.it	Robowave Bending
Robosoft www.robosoft.be	Automated bending system

Tabela 6 – Exemplos de softwares específicos para a simulação e programação de robôs e quinadoras em células de quinagem robotizadas

De acordo com a classificação do ponto anterior, as soluções KUKA e ABB são proprietárias de cada marca, indicadas portanto para o uso dos seus robôs com uma dada quinadora. A nível de funcionamento, “correm” o seu *software*-base de simulação *off-line* com módulos de expansão específicos para a operação de quinagem. A Figura 35 mostra uma célula de quinagem modelada com o Robotstudio, da ABB.

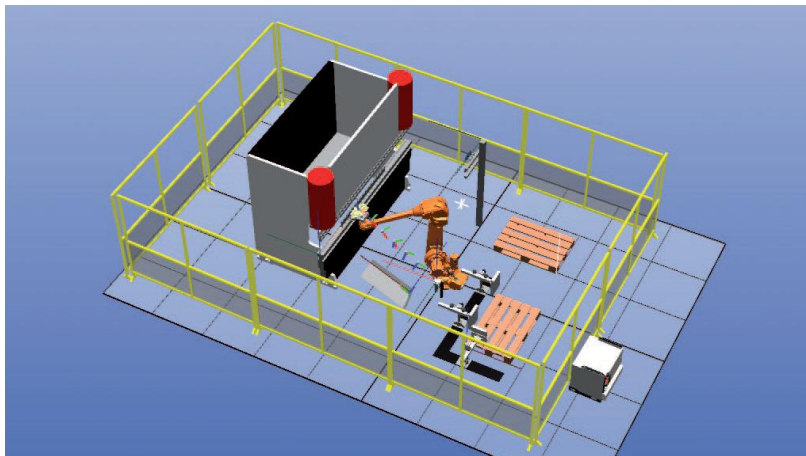


Figura 35 – Modelo de célula de quinagem com o software Robotstudio
([http://www05.abb.com/global/scot/scot241.nsf/veritydisplay/bf9603a1e4ec66e9c125764a00477c50/\\$file/ROBO148EN_A%20HR.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot241.nsf/veritydisplay/bf9603a1e4ec66e9c125764a00477c50/$file/ROBO148EN_A%20HR.pdf))

As soluções independentes ERXA e Robosoft funcionam em versões *standalone*, passíveis de exportar os programas em várias linguagens de programação, consoante a sua existência na biblioteca de pós-processadores. A Figura 36 mostra a solução Robosoft, em que o posicionamento da peça é feito com uma garra e sem o auxílio dos esbarros da quinadora.

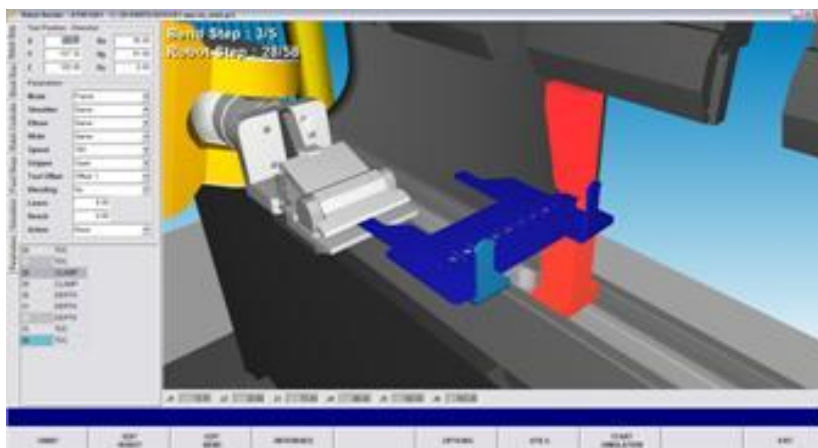


Figura 36 – Simulação de quinagem com o software Robosoft
(http://www.robosoft.be/index_bestanden/RobotBendingSystem.htm)

4. Software de programação *off-line* RoboWave Bending

O software de programação *off-line* escolhido para implementar na célula de quinagem robotizada foi o RoboWave Bending, V1.1 SP5, da empresa italiana ERXA S.r.l. Este software está dotado de capacidades de simulação e programação de robôs em modo *off-line*, concebido para uma utilização exclusiva com células de quinagem robotizadas.

A grande vantagem encontrada no RoboWave Bending é o facto de este ser um “software genérico”, que permite uma maior flexibilidade na integração com robôs e quinadoras de vários fabricantes. Por outro lado, a possibilidade de se integrarem robôs de várias marcas leva a que seja de esperar uma menor robustez dos modelos dinâmicos do robô simulado, quando comparado com os softwares dedicados dos fabricantes.

Segundo os autores do software, esta é uma ferramenta que simula todo o processo de quinagem, desde que o robô pega numa chapa lisa até que depõe a mesma como produto acabado, sendo especialmente endereçada a utilizadores que necessitem de utilizar equipamento de quinagem robotizada sem terem muita experiência no uso de equipamento robótico. O RoboWave Bending é também útil aos integradores de sistemas dada a abertura e flexibilidade do software, permitindo-lhes a integração de *know-how* para se diferenciarem da concorrência e responderem às necessidades específicas dos clientes.

4.1 Visão geral

O RoboWave Bending é uma ferramenta informática dedicada a células de quinagem robotizadas, que permite a simulação e programação *off-line* automática tanto do robô manipulador como da própria quinadora, de forma independente, consoante a linguagem de programação específica do equipamento utilizado.

O software funciona com uma série de aplicações, sendo estas dedicadas à importação e edição de cada objeto da célula consoante a sua função, à gestão das células disponíveis para simulação e à simulação e consequente exportação dos programas para o robô e a quinadora.

Este programa tira partido da modelação 3D dos elementos da célula de produção e de um motor de simulação gráfica para otimizar o processo produtivo. Além dos objetos disponibilizados nas bibliotecas de objetos existentes, a importação de ficheiros de CAD é possível usando formatos neutros, de modo a não vincular o utilizador à modelação dos elementos da célula com um *software* específico. É também possível a modelação de objetos diretamente no próprio programa com uma ferramenta de CAD que este possui, ou fazer modificações a modelos importados.

A aplicação de modelação de peças para quinagem permite a importação de ficheiros CAD 2D com distinção de *layers* nos formatos DXF (formato CyCad), ou GEO (formato Trumpf). Após importação, é possível visualizar representações tanto da chapa plana como do aspeto da peça após quinagem, conforme ilustrado na Figura 37.

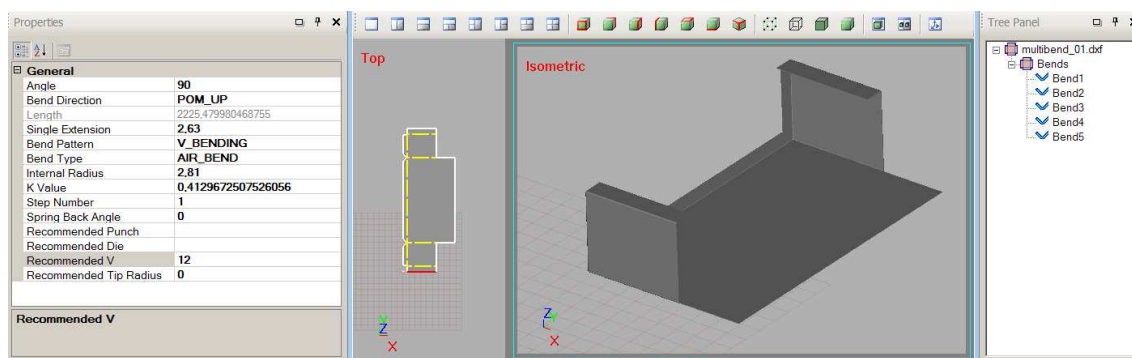


Figura 37 – Modelação de peça para quinagem com o RoboWave Bending
(http://www.robowave.com/images/stories/doc/RoboWave_bending_technical_presentation_ENG.pdf)

São admitidos nesta aplicação todos os tipos de quinagens mais usuais, como a quinagem “no ar”, “a fundo”, em “V”, em “U”, esmagamentos, quinagens compostas, etc. É também possível a visualização e modificação de dados referentes à quinagem, como o valor dos ângulos ou a orientação dos mesmos, e fazer a gestão dos parâmetros de quinagem, como o fator K, a constante de elongação metálica ou os raios internos.

O RoboWave Bending incorpora nas suas bibliotecas modelos de punções e matrizes de vários fabricantes. É também possível fazer a importação de perfis de ferramentas diretamente no formato do software ou usando as funcionalidades CAD em

2D. As ferramentas podem ser dispostas no modelo para uma utilização frontal ou "atrás" da quinadora, e com a montagem convencional (punção no avental superior e matriz no avental inferior) ou invertida. A inversão da montagem das ferramentas na quinadora (punção no avental inferior e matriz no avental superior) permite, em alguns casos, o aumento da área de trabalho e uma maior facilidade do robô em fazer o acompanhamento da chapa durante a quinagem. Nos casos aplicáveis, este arranjo de ferramentas pode diminuir o tempo de ciclo e aumentar a qualidade final do produto.

O software comporta o uso de ferramentas de prensão com vários TCPs (*Tool Center Point*, ou ponto central da ferramenta), de ação pneumática, magnética, mecânica ou por ação combinada. O *gripper* (ou ferramenta de prensão do robô) com elementos estáticos (elementos magnéticos e/ou ventosas pneumáticas) é composto por uma ou mais guias, onde estão montados os elementos que entram em contacto com a chapa. Ao associar a estes elementos de prensão diferentes sinais de comando, é possível ter um arranjo flexível para a manipulação de chapas de diferentes tamanhos e geometrias, utilizando TCPs diferentes para cada combinação de sinais de comando ativos. As garras mecânicas (*claspers*) podem apresentar as seguintes configurações ilustradas na Figura 38:

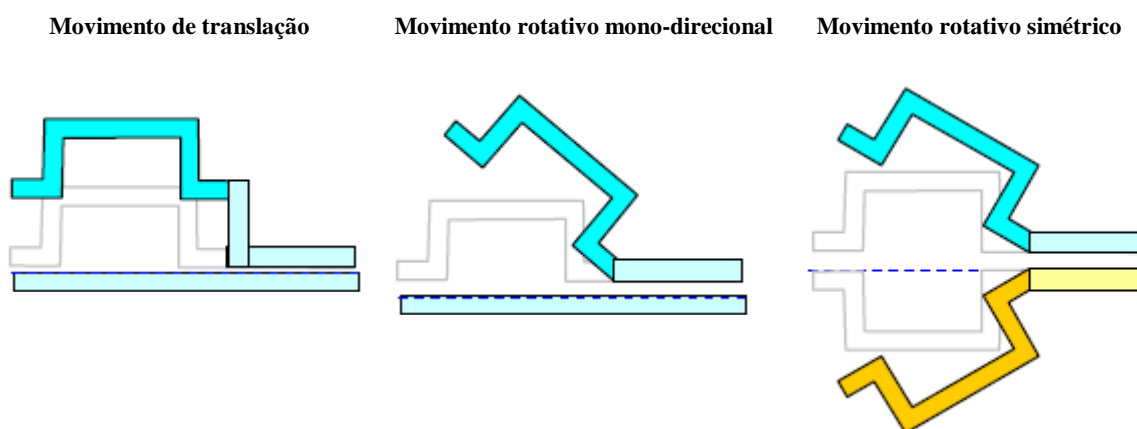


Figura 38 – Princípio de funcionamento das garras do RoboWave Bending
(http://www.robowave.com/images/stories/doc/RoboWave_bending_technical_presentation_ENG.pdf)

A disposição dos objetos na célula virtual com vista à realização da simulação é realizada após a importação/modelação dos mesmos para as bibliotecas do software. Fica a cargo do utilizador a configuração da célula e otimização espacial dos objetos existentes, no sentido de este cumprir os requisitos de produção de acordo com as limitações de espaço existentes. A célula pode ser composta pelos seguintes elementos:

- **robô** manipulador, passível de ser montado no solo ou num nível superior (elevado) ou inferior (num fosso) a este, no teto ou num pórtico, ou ainda num eixo auxiliar, seja este rotativo ou linear
- **quinadora**, passível de ser montada no solo ou num nível superior a este (elevada)
- **postos de alimentação de chapa**, sejam estes paletes, tapetes ou outros sistemas automáticos
- **postos de deposição dos produtos acabados**, sejam estes paletes, tapetes ou outros sistemas automáticos
- **sistemas de centragem** (indexação do posicionamento da chapa), sejam estes de funcionamento por gravidade, motorizados, automáticos ou com sistemas de visão
- **postos de mudanças de fixação** (*re-gripping*), com braços fixos ou motorizados, de disposição horizontal ou vertical
- **sistemas de medida/detecção de dupla chapa**

A definição do processo de quinagem é feita de forma automática, de acordo com o modelo da peça importado, podendo ser sujeita a alterações por parte do utilizador. Tendo em conta que a peça é manipulada do robô, a definição do processo é realizada com o auxílio das seguintes funcionalidades:

- **AUTO-SEQ** cálculo de sequências de quinagem baseadas em parâmetros e restrições configuráveis.
- **AUTO-TOOL** seleção das combinações de ferramentas a utilizar e o posicionamento das mesmas na quinadora, consoante as existências na biblioteca de ferramentas e considerando eventuais colisões no processo de quinagem.
- **AUTO-GAUGE** execução do posicionamento dos esbarros, consoante as existências na biblioteca de ferramentas e tendo em conta a geometria tridimensional da peça durante a quinagem. O software é capaz de definir o posicionamento dos esbarros para as configurações mais correntes, sejam elas de 4, 5 ou 6 eixos.

Todas estas tarefas são passíveis de ser modificadas e recalculadas em função das restrições impostas pelo operador. Posteriormente, o software executa através da função AUTO-GRIP o posicionamento automático dos grippers consoante as existências na biblioteca de grippers, tendo em conta a geometria tridimensional da peça durante a quinagem e de modo a minimizar reposicionamentos e otimizar os movimentos do robô. Um exemplo da utilização destas funcionalidades está apresentado na Figura 39.

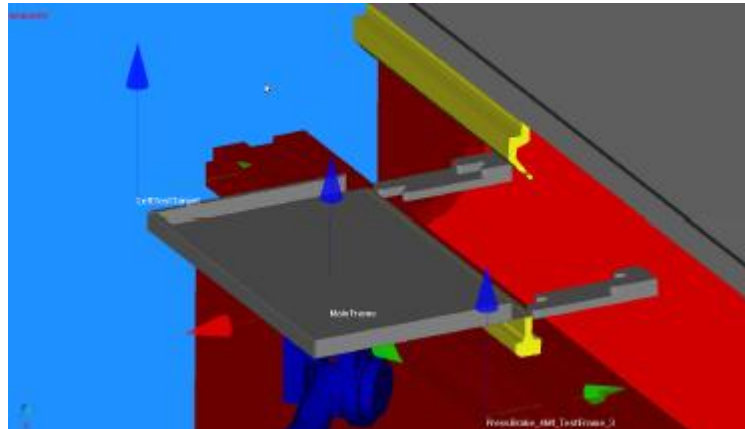


Figura 39 - Definição automática do processo de quinagem do RoboWave Bending
(http://www.robowave.com/images/stories/doc/RoboWave_bending_technical_presentation_ENG.pdf)

O RoboWave Bending gera todas as trajetórias a cumprir pelo robô, incluindo o 7º eixo, usando regras heurísticas próprias, desde o ponto de prensão da chapa plana até à paletização desejada dos produtos acabados. As regras heurísticas visam a criação das trajetórias do robô e permitem ao utilizador a especificação e adaptação das mesmas em cada etapa do processo produtivo, de modo a otimizar os ciclos de quinagem em função dos diferentes tipos de células e das próprias peças a serem produzidas. O software contém de base algumas destas regras heurísticas, sendo que estas podem ser configuradas, modificadas e gravadas, de modo a que o operador possa aumentar as capacidades de simulação do software, pela integração do seu conhecimento. A simulação comporta todo o ciclo de produção, sendo possível corrigir as trajetórias do robô manualmente para evitar eventuais colisões e posições de singularidade. Um exemplo da utilização da aplicação de simulação e programação está apresentado na Figura 40.

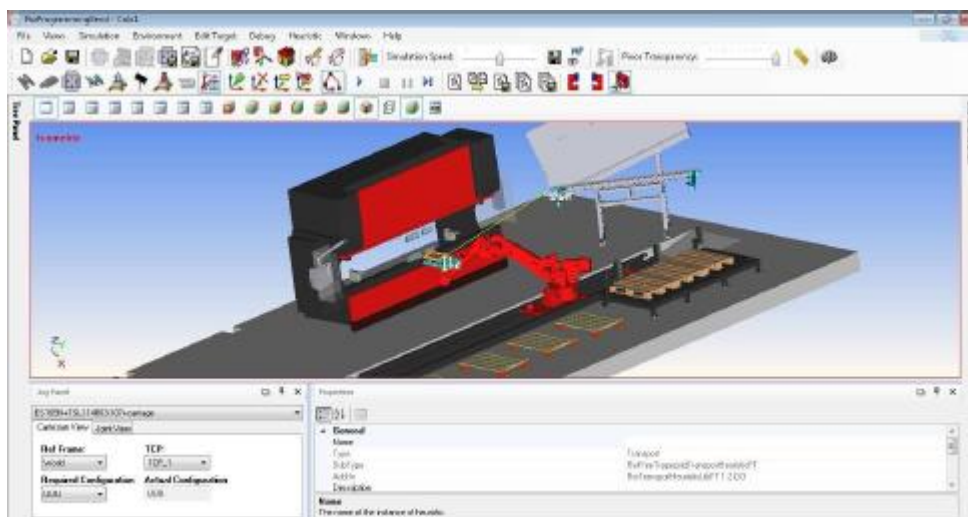


Figura 40 – Simulação de célula de quinagem com o RoboWave Bending
(http://www.robowave.com/images/stories/doc/RoboWave_bending_technical_presentation_ENG.pdf)

O processo de paletização é definido pelo utilizador no software e incorporado na programação *off-line* do robô. O utilizador tira assim partido da simulação gráfica para observar a simulação de todo o processo e proceder à otimização do mesmo no ambiente virtual, como o correto posicionamento de ferramentas. A verificação dos alcances do robô na zona de trabalho, e a otimização dos movimentos do robô em função dos requisitos da produção e das limitações de espaço, são também executadas pelo software. Existem funcionalidades úteis neste sentido, como a deteção de colisões e uma estimativa do tempo de ciclo do processo simulado.

A programação do robô e quinadora, relativos a cada simulação realizada, é escrita por defeito no formato XML. Através do pós-processamento desta informação, separadamente para o robô e quinadora, obtém-se a programação nas linguagens respetivas do equipamento utilizado. A utilização deste software, desde a importação de objetos até à exportação dos programas gerados, pressupõe uma sequência de tarefas a realizar, sucintamente esquematizada na Figura 41.

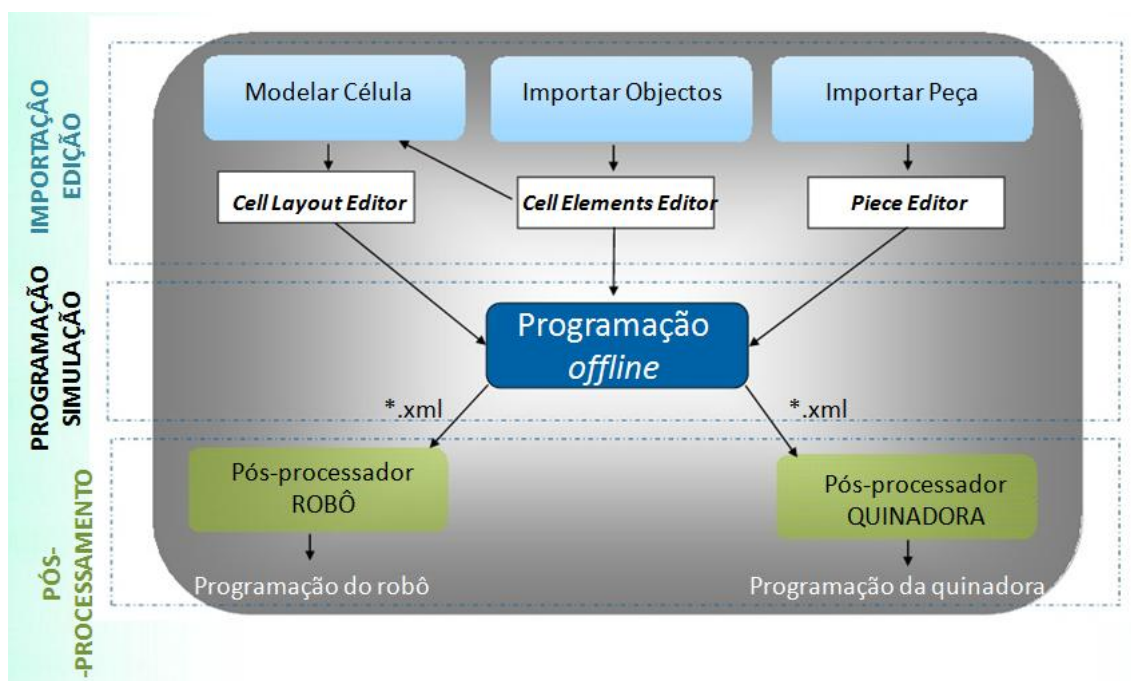


Figura 41 – Esquema da utilização do software RoboWave Bending

(http://www.robowave.com/images/stories/doc/RoboWave_bending_technical_presentation_ENG.pdf)

4.2 Importação e edição de modelos CAD

O RoboWave Bending tem uma aplicação específica para a modelação de cada objeto constituinte da célula de quinagem, consoante a sua função. Após a importação/edição/criação do objeto na aplicação correspondente, este passa a figurar na biblioteca de objetos e disponível para a incorporação na aplicação de criação/edição da célula de quinagem.

A definição dos referenciais locais dos elementos funcionais dos objetos é de crucial importância para uma correta interação entre objetos na simulação da célula de quinagem.

A modelação de elementos da célula de quinagem, a disposição desses elementos na célula e das peças a serem produzidas, é realizada em aplicações separadas. Estes elementos consistem no robô, grippers (Figura 43), quinadora, punções e matrizes, esbarros da quinadora (Figura 42), estações de aquisição de chapa e deposição de produtos acabados, estação de indexação da posição da chapa, sistemas de medição/detecção de dupla chapa e objetos fixos.

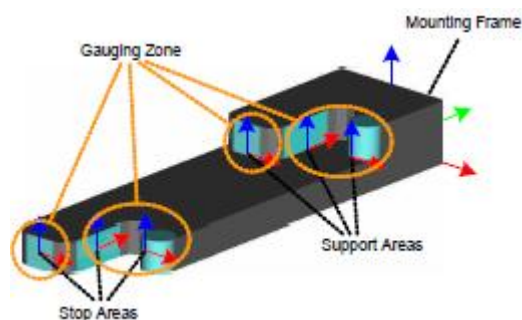


Figura 42 – Esquema de modelação de esbarro com o RoboWave Bending

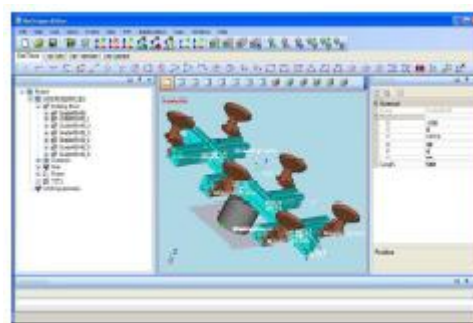


Figura 43 – Aplicação de modelação de gripper do RoboWave Bending

(http://www.robowave.com/images/stories/doc/RoboWave_bending_technical_presentation_ENG.pdf)

Nestas aplicações é possível importar, modificar, criar e armazenar elementos na respetiva biblioteca (ficando assim disponíveis para futuras utilizações), bem como definir parâmetros e características específicas aos elementos em questão.

O Editor da disposição dos elementos na célula (*Cell Layout Editor*) permite criar a célula virtual, pela disposição de elementos disponíveis nas bibliotecas, e verificar o seu posicionamento relativo na procura da solução mais adequada (Figura 44). É ainda possível a importação de dados de calibração da célula, de modo a ajustar a célula virtual a uma célula real existente.

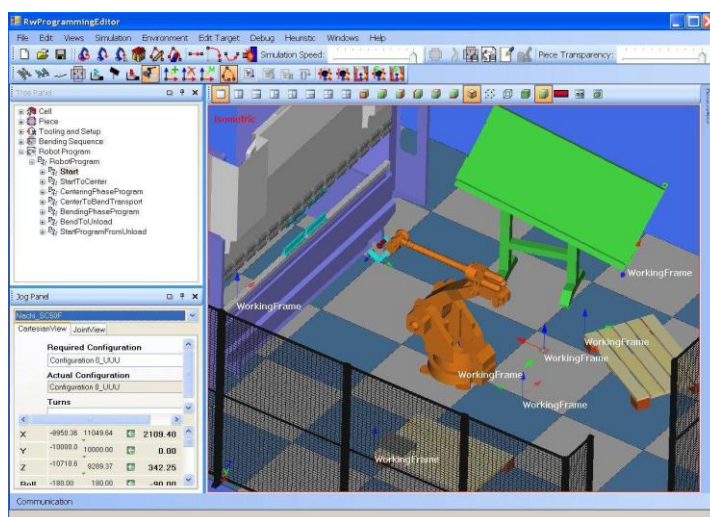


Figura 44 – Aplicação de edição de célula de quinagem do RoboWave Bending
(http://www.robowave.com/images/stories/doc/RoboWave_bending_technical_presentation_ENG.pdf)

Visto que a aplicação de simulação e programação funciona com uma célula predefinida, o editor multicelular (*Multi Cell Editor*) torna-se particularmente útil quando o utilizador pretende programar várias células com o mesmo software. Esta

aplicação torna possível o foco individual em cada uma das células, de modo a serem simuladas independentemente.

4.3 Programação e simulação

Na aplicação de programação e simulação, após a atribuição da peça a produzir, há um procedimento de 3 etapas a seguir até à obtenção da programação para robô e quinadora:

- Configuração de dispositivos e ferramentas (*Set-up/Tooling*)
- Definição do processo de quinagem (*Bending Process Definition*)
- Programação e simulação (*Programming & Simulation*).

Este procedimento está esquematizado na Figura 45, com a indicação das subáreas em cada etapa.

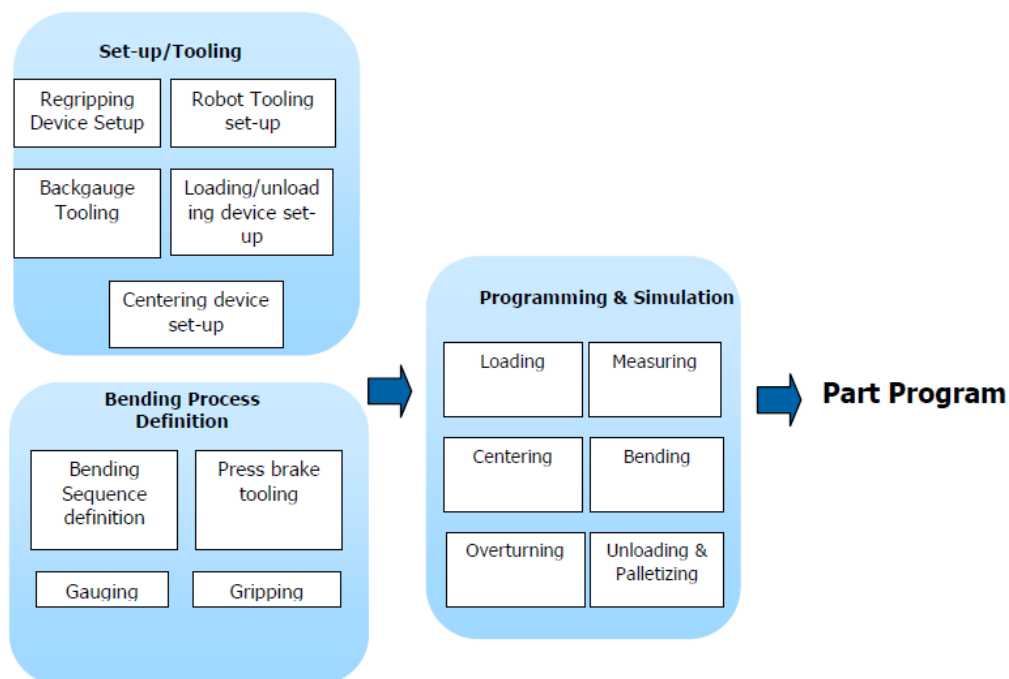


Figura 45 – Procedimento e subáreas na geração da programação com o RoboWave Bending (http://www.robowave.com/images/stories/doc/RoboWave_bending_technical_presentation_ENG.pdf)

A configuração de dispositivos e ferramentas inclui a seleção e configuração dos esbarros da quinadora, do gripper do robô, do posto de mudança de fixação, do sistema de centragem e dos postos de alimentação de chapa e deposição de produtos acabados.

A definição do processo de quinagem é realizada com grande detalhe (Figura 46). É possível escolher as ferramentas da quinadora (punções e matrizes), e como estas são montadas, posicionar os esbarros em cada quinagem e definir as posições de preensão do gripper do robô durante o processo de quinagem. Todas estas operações podem ser realizadas de forma completamente automática pelo software, ou pelo operador através de interfaces gráficas simples.

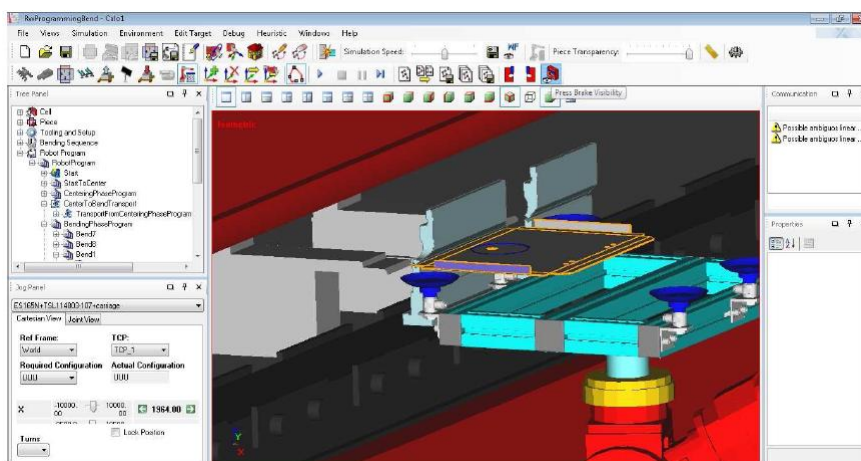


Figura 46 – Definição do processo de quinagem com o RoboWave Bending
(http://www.robowave.com/images/stories/doc/RoboWave_bending_technical_presentation_ENG.pdf)

O software gera automaticamente todas as trajetórias do robô com vista à execução do ciclo de produção. A programação e simulação de todo o processo pode estar assim disponível para operadores sem uma grande experiência em quinagem de chapa e robótica. Esta aplicação permite visualizar o modelo tridimensional da célula de quinagem com todo o equipamento posicionado nos locais desejados, segundo as configurações anteriores. O software gera a simulação do processo seguindo a seguinte ordem:

- aquisição de chapa pelo robô numa paleta/tapete
- detecção de dupla chapa
- centragem da chapa e possível mudança de fixação
- sequência de quinagem com eventuais mudanças de fixação

- deposição do produto acabado e paletização

Para cada etapa do ciclo de quinagem, o software gera automaticamente os pontos a visitar e o tipo de trajetória a seguir pelo robô. É também verificada a acessibilidade dos pontos e o risco de possíveis colisões, ainda que o operador possa fazer alterações ao "ensino" do robô através de interfaces gráficas simples (Figura 47).

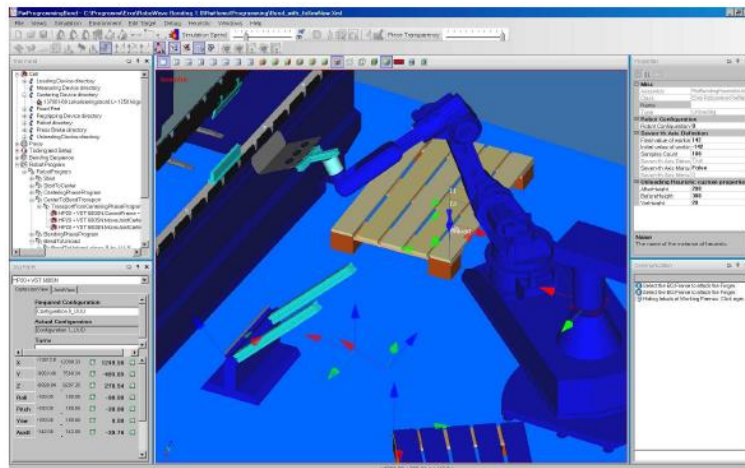


Figura 47 – Alteração de trajetórias do robô com o RoboWave Bending
(http://www.robowave.com/images/stories/doc/RoboWave_bending_technical_presentation_ENG.pdf)

O RoboWave possibilita a programação da deposição de produtos acabados em várias paletes. Cada uma das paletes pode ter um padrão de paletização diferente, customizável, sendo também possível a criação de grupos de peças. Na Figura 48 apresenta-se uma estrutura de paletização possível com este software.

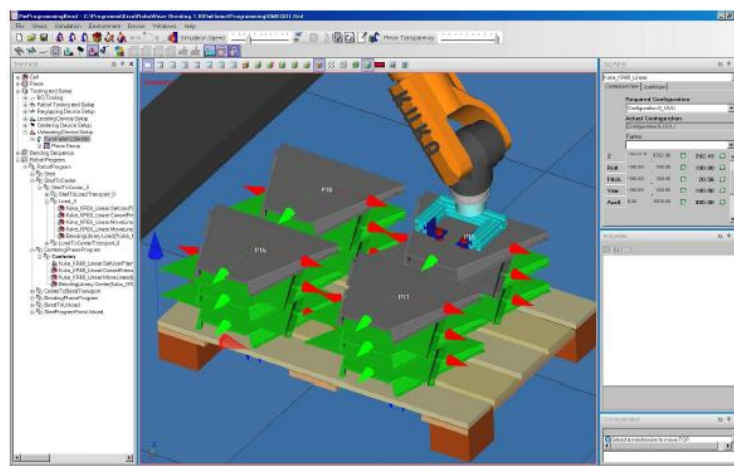


Figura 48 - Programação da paletização com o RoboWave Bending
(http://www.robowave.com/images/stories/doc/RoboWave_bending_technical_presentation_ENG.pdf)

4.4 Pós-processamento

O RoboWave Bending gera todos os programas obtidos na aplicação de simulação e programação num formato neutro (XML). Posteriormente, estes programas são transcritos nas linguagens específicas do robô e quinadora através de pós processadores dedicados para cada modelo destes equipamentos. Esta filosofia permite desenvolver soluções de gestão de produção flexíveis, dado que o pós-processamento é totalmente customizável. A Figura 49 representa a lógica seguida no pós-processamento da programação da quinadora e do robô, sendo que a última é analisada com mais detalhe no ponto seguinte.

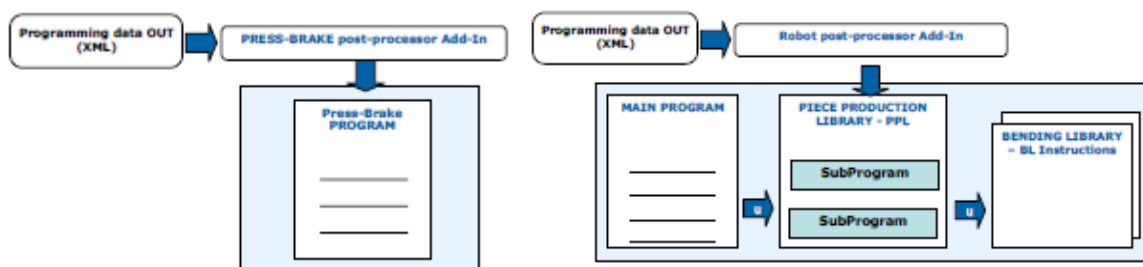


Figura 49 - Lógica de pós-processamento para quinadora (à esquerda) e robô (à direita) com o RoboWave Bending

(http://www.robowave.com/images/stories/doc/RoboWave_bending_technical_presentation_ENG.pdf)

4.4.1 Estruturação da programação do robô

A programação do robô para trabalhar uma dada peça compreende a "aquisição" da chapa plana, sequência de quinagem e descarga do produto acabado. Escrita na linguagem de programação do robô, esta programação é uma composição de três blocos, conforme ilustrado na Figura 50, nomeadamente os blocos MAIN, PIECE PRODUCTION LIBRARY (PPL) e BENDING LIBRARY (BL).

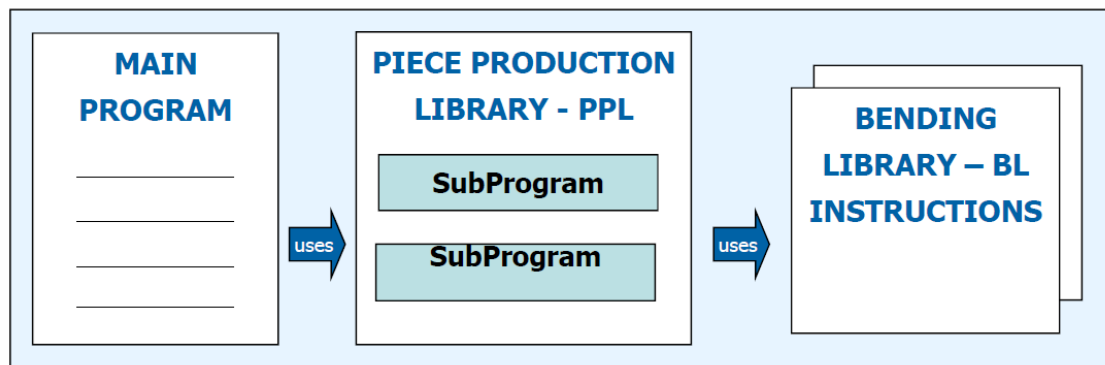


Figura 50 – Lógica de pós-processamento para o robô com o RoboWave Bending
(http://www.robowave.com/images/stories/doc/RoboWave_bending_technical_presentation_ENG.pdf)

O bloco MAIN gere a produção e calendarização, assim como a contagem de peças, diferenciação de lotes, relatórios de produção, gestão e recuperação de erros. Pode também gerir possíveis interferências com equipamentos externos não identificados pelo sistema RoboWave Bending.

De modo a produzir uma peça, o bloco MAIN usa uma série de funções, que estão reunidas numa biblioteca de funções PPL relativa a essa peça. Na filosofia do programa o MAIN é genérico, permitindo ao utilizador processar peças diferentes por alteração das chamadas das funções da PPL. Assim, este bloco é independente da PPL e da BL, já que a PPL representa uma virtualização de produção de peças para o MAIN.

A PPL é gerada por um programa pós-processor. Este programa lê a estrutura interna de dados do RoboWave Bending e, partindo daí, executa o pós-processamento destes dados e escreve um leque de funções na linguagem específica do robô. A PPL está adaptada para uma peça específica, logo para processar duas peças diferentes o RoboWave Bending gerará duas PPL diferentes. No entanto, estas duas PPLs terão sempre o mesmo nome (a PPL tem uma interface comum), de modo a que possam ser acedidas pelo bloco MAIN.

A biblioteca PPL contém dois tipos de funções, chamadas “de fase” ou “de transporte”. As funções “de fase” são funções para a realização de operações específicas, tais como, carregar uma peça, medição da espessura, centragem, quinagem, etc. As funções de transporte dizem respeito ao transporte da peça entre postos, como por exemplo o transporte da paleta de chapa para o detetor de dupla chapa, deste para a mesa de indexação, e por aí adiante. A PPL não inclui procedimentos de recuperação de erros (ex: perda de chapa ou deteção de dupla chapa).

De modo a executar as operações que requerem uma interação específica com outros componentes da célula (ex: detetor de dupla chapa, mecanismos de medida, canais de vácuo, quinadora, etc.), a PPL chama a biblioteca específica de funções BL. A BL disponibiliza procedimentos com uma interface padronizada, independentemente das características específicas da implementação da célula de quinagem. Desta forma é possível fazer-se a separação entre a materialização física da célula e o programa propriamente dito. Apresenta-se na Figura 51 um exemplo de como funciona a estruturação da programação descrita neste ponto.

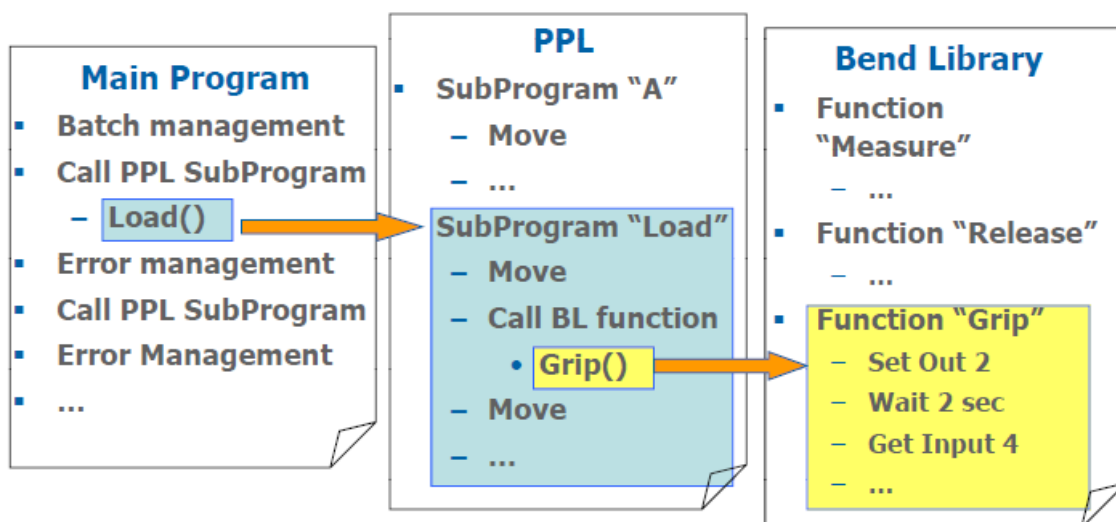


Figura 51– Estrutura da programação do robô com o RoboWave Bending
(http://www.robowave.com/images/stories/doc/RoboWave_bending_technical_presentation_ENG.pdf)

Cada um dos três blocos (MAIN, PPL e BL) pode ser definido pela ERXA ou pelo fabricante do robô. A gestão de erros será feita pelo utilizador do robô, pelo seu conhecimento da tecnologia empregue nas células e os seus riscos.

5. Simulação e programação *off-line* da célula de quinagem ADIRA

5.1 Célula ADIRA

A solução comercial da ADIRA de células de quinagem, ilustrada na Figura 52, faz uso de uma quinadora da gama PF (anteriormente descrita no ponto 2.2), por ser a que garante uma maior velocidade operativa, maior rigor no posicionamento e maior precisão no resultado final das peças quinadas. Nesta Figura estão numerados os seguintes equipamentos:

- 1 - Quinadora ADIRA da gama PF
- 2 - Robô manipulador Motoman de 6 eixos
- 3 - Base rotativa do robô, ou “7º eixo”
- 4 - Mesa de referência, ou esquadro
- 5 - Mesa de alimentação de chapa
- 6 - Dispositivo de alimentação de chapa

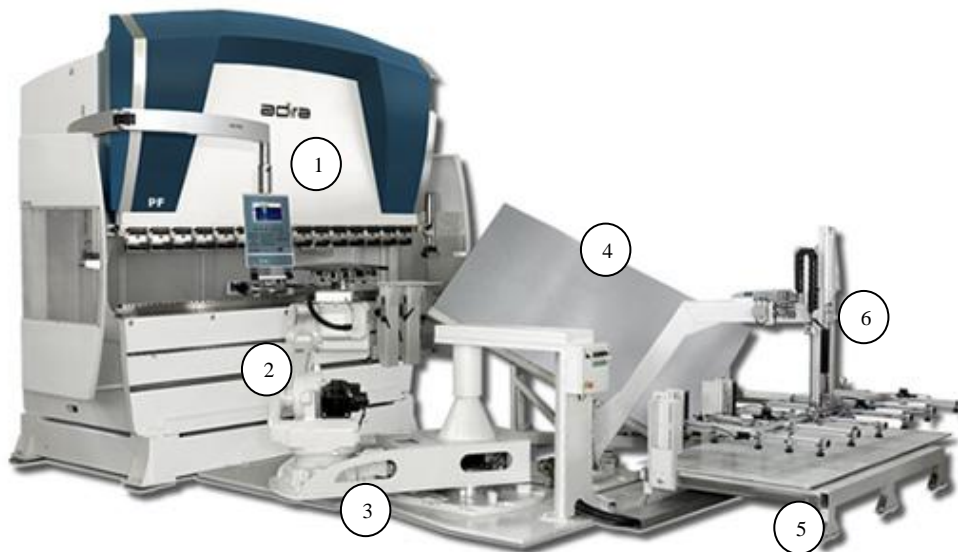


Figura 52 – Célula de quinagem da ADIRA (www.adira.pt)

Não se encontra ilustrada a paleta para paletização dos produtos acabados e os dispositivos para a detecção de dupla chapa e viragem/mudança de fixação (*regrip*), sendo que estes últimos, assim como o “Alimentador de Chapa”, são equipamentos opcionais que podem ser incluídos na célula de quinagem.

O robô utilizado é um Motoman de seis eixos da linha MH, montado numa base rotativa (ou 7º eixo), em posição excêntrica em relação ao eixo de rotação desta, de modo a aumentar o alcance do *gripper*.

O "Alimentador de Chapa" é formado por dois dispositivos essenciais que colocam as chapas na posição de referência sem que o robô tenha qualquer tipo de intervenção neste processo. Esta é uma unidade autónoma destinada à tarefa de carregar chapas novas, estas funções são executadas em simultâneo com o trabalho do robô, pelo que reduz substancialmente o tempo de ciclo de fabrico de cada peça. O ciclo de verificação da existência de dupla chapa é também efetuado pelo "Alimentador de Chapa" e, no caso de haver duas chapas coladas, repete o ciclo de carga de chapa nova.

Ainda assim, é possível aos clientes configurarem a célula com ou sem “Alimentador de Chapa”, ficando no segundo caso a colocação da chapa na mesa de referência a cargo do robô. É ainda possível uma solução com dois robôs, ficando um deles afeto às funções do “Alimentador de Chapa” e à paletização de produtos acabados, libertando o segundo robô para a sequência de quinagem propriamente dita, no sentido da otimização do tempo de ciclo.

5.1.1 Adaptação da quinadora convencional para ser operada por robô

De acordo com a lógica de controlo da célula de quinagem, todos os equipamentos de controlo numérico da célula são comandados pelo controlador do robô, sendo que a comunicação é feita através do PLC do próprio controlador do robô. A Figura 53 representa uma esquematização da referida lógica.

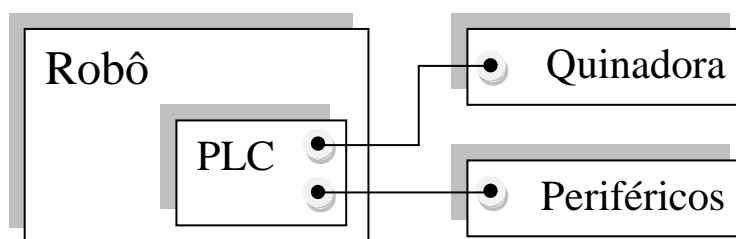


Figura 53 – Hierarquia de comando nas células de quinagem da ADIRA

Independentemente de ser operada por um robô ou por um humano, a quinadora tem já por defeito a programação de controlo numérico das suas funções. Ao ser integrada numa célula a quinadora irá ser operada por um robô, no entanto deixa-se sempre em aberto a possibilidade de se trabalhar em modo manual, ou seja, com um operador a comandá-la.

Deste modo a adaptação da quinadora convencional para ser operada por um robô passa pela organização do quadro elétrico da quinadora de forma a disponibilizar convenientemente os sinais de I/O necessários para a comunicação com o controlador do robô. É também necessária a inclusão de um sistema de comutação que permita tanto o comando manual como por parte do robô, duma forma que impossibilita o controlo manual quando o robô está ativo (e vice-versa) e alterações a nível do software e hardware da quinadora, para esta identificar se está a ser operada por um humano ou por um robô. Estas alterações são especialmente importantes devido à necessidade de se ativar as barreiras de segurança laser quando a quinadora é operada manualmente, o que não se verifica quando esta é operada pelo robô.

5.1.2 Descrição de funcionamento da célula de quinagem ADIRA

Com vista à compreensão do funcionamento da célula de quinagem foi elaborado um fluxograma representativo das tarefas envolvidas no ciclo de quinagem. De modo a simplificar a análise do processo, pressupôs-se que a célula não dispõe de um sistema automático de alimentação de peças e a mesa de referência é fixa. Logo, tanto a alimentação de chapa como a paletização da peça após a sequência de quinagem fica a cargo do robô.

Esta análise parte do pressuposto de que o robô não dispõe de meios para trocar ou ajustar os seus *grippers*, nem a quinadora tem meios de trocar ou ajustar as suas ferramentas. Estas operações serão realizadas por um operador humano, tipicamente entre a produção de lotes de peças diferentes, de modo a minimizar o tempo de paragem da célula. O referido fluxograma apresenta-se na Figura 54.

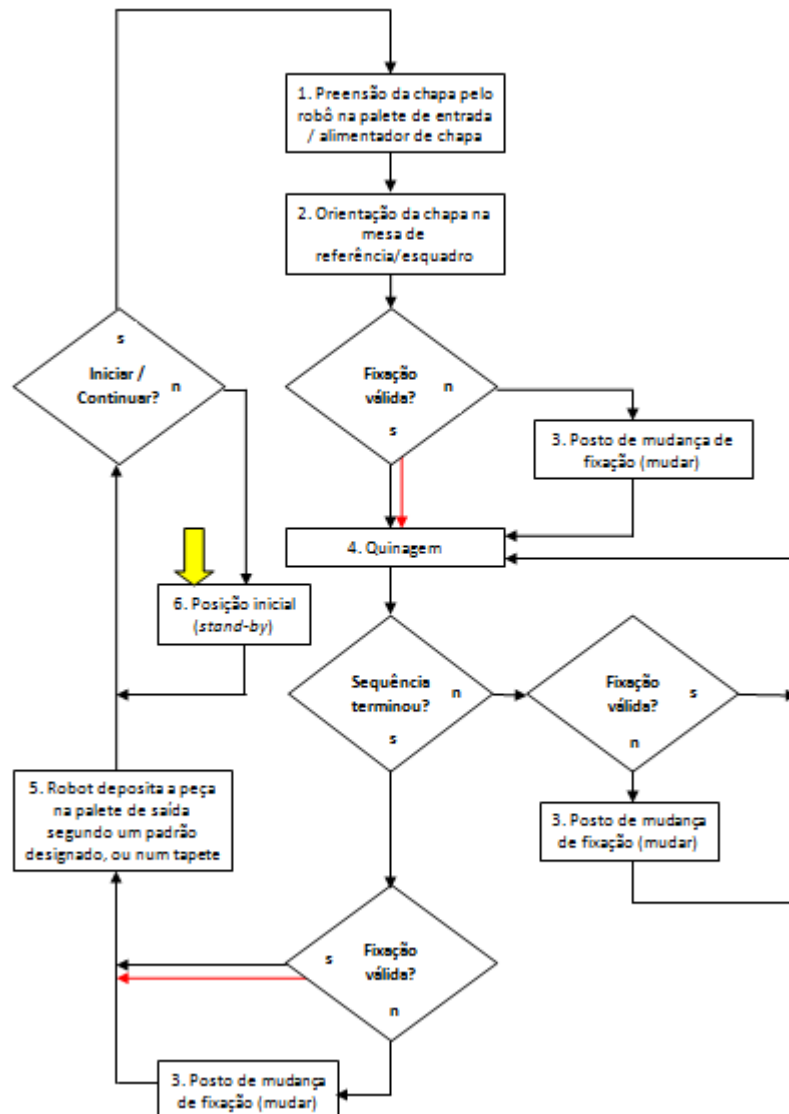


Figura 54 - Fluxograma descritivo do funcionamento das células de quinagem da ADIRA

As linhas a vermelho representam transições preferenciais, já que a sequência de quinagem é elaborada de modo a que não haja necessidade de mudar a fixação da chapa após a orientação na mesa de referência. Da mesma forma evitam-se mudanças de fixação no fim da sequência de quinagem, ou seja, na última quinagem que antecede a paletização.

Sempre que a sequência de quinagem de uma peça envolva diferentes combinações de punções e matrizes, estas ferramentas (ou pares de ferramentas) são montadas diretamente na quinadora, de modo a possibilitar a realização de todas as quinagens previstas na sequência, sem paragens para trocar ferramentas. Quando não é possível implementar essa solução, quer por falta de espaço na quinadora ou por limitações técnicas impostas pela própria sequência de quinagem, divide-se a sequência em etapas, sendo que em cada etapa se processa todo o lote em questão, com o intuito de se trocar de ferramentas o mínimo de vezes possível (logo, minimizando o tempo de paragem). Procede-se analogamente com as ferramentas do robô, ou seja, quando numa sequência de quinagem há mais do que uma solução de prensão de peças (configuração dos *grippers*), divide-se a sequência em blocos.

As trocas de ferramentas, tanto do robô como da quinadora, são então realizadas manualmente por um operador humano, que intervém após a movimentação do robô para uma posição de segurança e a imobilização de todo o equipamento.

5.2 Objeto do estudo

O objetivo que se propôs alcançar neste ponto foi o de avaliar a simulação do funcionamento de uma célula de quinagem ADIRA, com o software de simulação e programação off-line RoboWave Bending, e validar a programação resultante por implementação numa célula real, instalada nas instalações da empresa.

Foi realizada uma simulação prévia do funcionamento de uma célula de quinagem em ambiente virtual com o software Robotstudio da ABB, com uma versão gratuita disponibilizada no sítio desta empresa. A Figura 55 mostra a simulação gráfica obtida com o software da ABB.

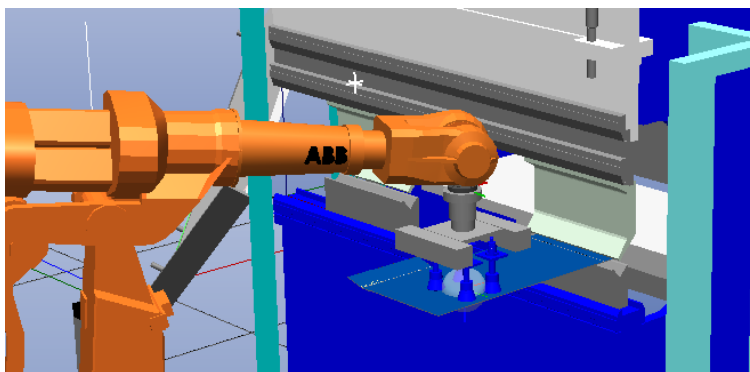


Figura 55 – Aspeto da simulação com o software Robotstudio da ABB

Este software serviu como ponto de partida para uma utilização mais expedita do software da ERXA, partindo-se do princípio que teriam funcionamentos similares. Nesta simulação com a ferramenta da ABB não se procurou uma simulação com as condições da ADIRA, nem na modelação do equipamento (foram utilizados exclusivamente objetos que já constavam nas bibliotecas de origem) nem no próprio funcionamento específico da célula.

A utilização do RoboWave Bending foi mais profunda e seguiu a seguinte ordem de tarefas:

- Modelação da célula ADIRA
- Simulação de ciclo de maquinagem com peça e gripper hipotéticos
- Teste da programação na célula real

5.2.1 Modelação da célula da ADIRA

A modelação de objetos no software é realizada através das aplicações dedicadas a cada objeto. Os formatos admissíveis para a importação de modelos de CAD para a modelação dos vários elementos constituintes da célula de fabrico virtual são: DXF, X, MDL, IGS e STL. Estes modelos importados podem ser alterados com a ferramenta de CAD embutida nas aplicações relativas aos componentes, ou criados de raiz a partir da mesma.

De um modo geral, todos os posicionamentos de objetos podem ser definidos quer por introdução direta das coordenadas desejadas em relação a um referencial local (por preenchimento na janela de propriedades dos objetos), quer por “arrasto” ou manipulação visual segundo direções principais. Na janela de propriedades dos objetos,

o posicionamento destes é expresso na notação **X**, **Y**, **Z**, **Roll** (Rz), **Pitch** (Ry), **Yaw** (Rx). No caso do robô, o posicionamento e orientação do seu órgão terminal é definido em relação ao referencial global da célula, que é a base do robô, bem como as configurações possíveis da cadeia cinemática para atingir a desejada posição/orientação do órgão terminal. Em todas as definições de posições do robô define-se a posição do 7º eixo, em graus (°). Na célula da ADIRA, a origem do referencial global irá coincidir com a base do eixo suplementar, ou 7º eixo.

Para testar a importação de objetos foi utilizado o software de modelação 3D Solidworks. O objeto modelado foi uma EuroPallet 1200x800 (Figura 56).

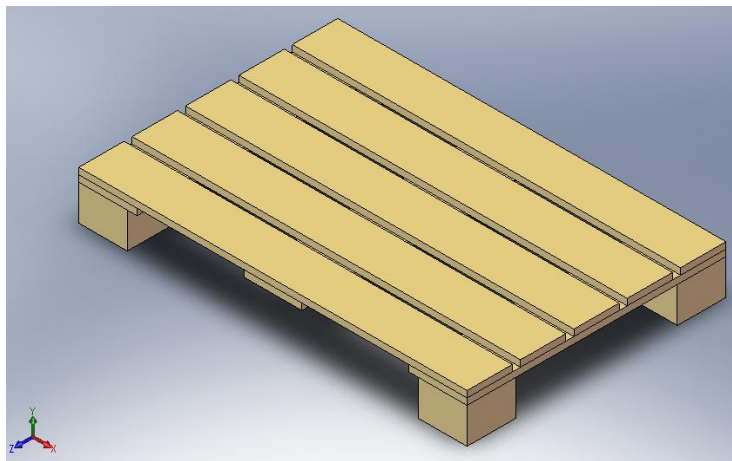


Figura 56 – Europallet 1200x800 modelada em Solidworks

Foram testados os formatos Parasolid (*.x_t) e Parasolid Binary (*.x_a) sem grande sucesso na importação para o RoboWave Bending. O formato IGES (*.IGS) foi importado sem problemas, bem como o formato STL (*.STL), sendo que, para o segundo, o software em teste admitiu a importação de 4 elementos de cada vez, com recurso ao *refresh* dos menus. O formato MDL não foi testado visto estar relacionado com o software Motosim da Motoman, que não estava disponível.

De um modo geral foram aproveitados ao máximo os modelos existentes nas bibliotecas de objetos, fornecidos pelo suporte técnico da ERXA para o teste do software. Na maior parte dos casos os objetos da simulação foram apenas configurados. Ainda assim todas as aplicações de modelação de objetos foram exploradas com vista à compreensão do funcionamento das mesmas.

Quinadora

A aplicação de edição da quinadora permite a criação/importação/alteração do modelo tridimensional da mesma, além da definição das suas características funcionais, como os seus limites físicos a nível de carga, velocidade, aceleração, comprimento útil de quinagens e cursos dos “esbarros” a incorporar. Esta aplicação encontra-se ilustrada na Figura 57.

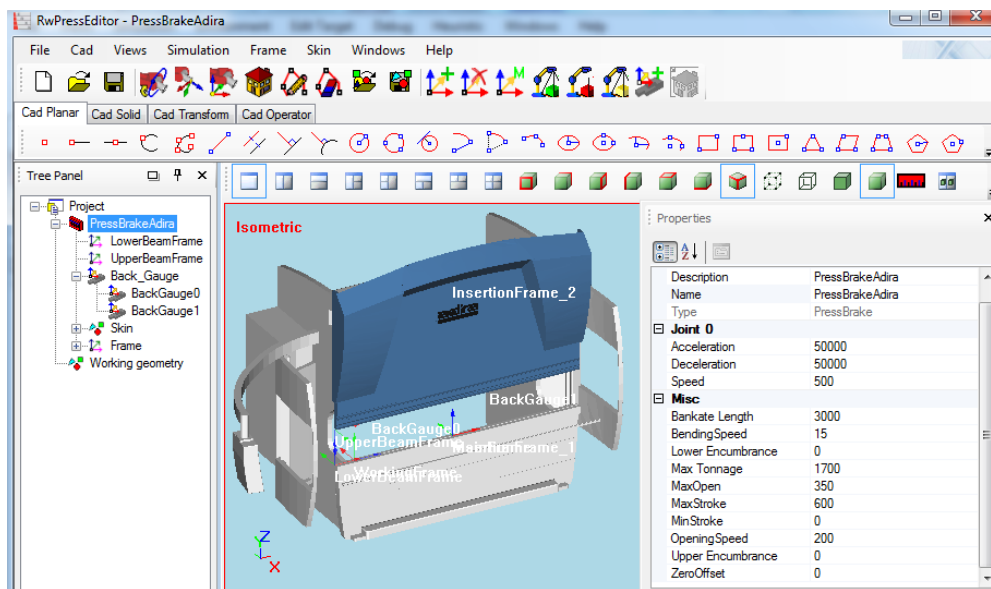


Figura 57 – Aplicação de edição da quinadora do RoboWave Bending

Robô

A aplicação de modelação do robô permite criar um mecanismo antropomórfico até 6 graus de liberdade e pode ainda incluir um 7º eixo, linear ou rotativo (Figura 58) ou então utilizar um modelo de um robô existente na biblioteca do programa.

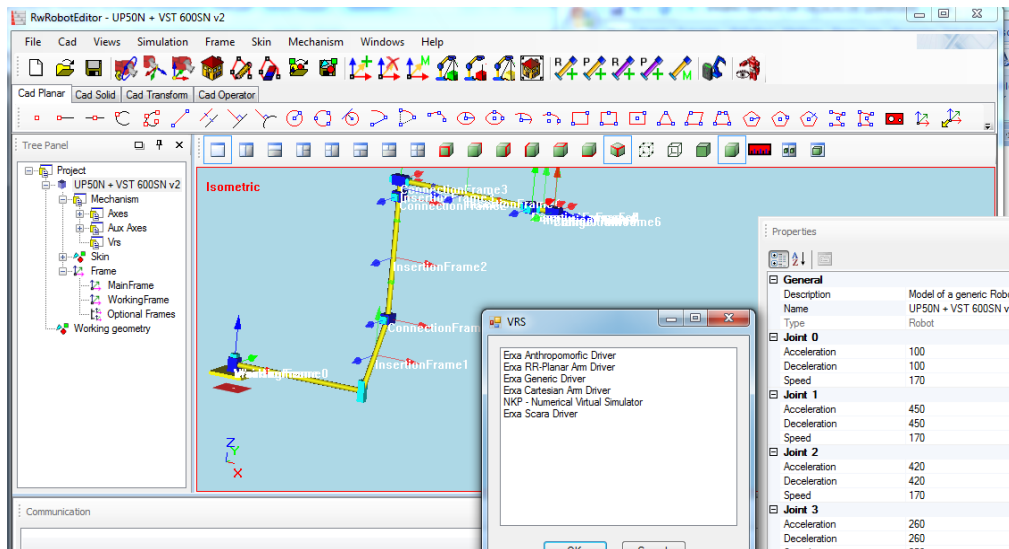


Figura 58 – Aplicação de edição do robô do RoboWave Bending

O procedimento de modelação do robô envolve:

- a criação da cadeia cinemática do robô (com a inserção das respectivas juntas rotativas ou prismáticas), conforme o exemplo da Figura 58
- o correto posicionamento dos referenciais de ligação entre segmentos
- a inserção da junta auxiliar, no caso de haver um eixo suplementar
- a associação de um *driver* cinemático ao mecanismo, entre os existentes na biblioteca
- a criação ou importação dos elementos geométricos que definem o “corpo” do robô
- a ligação do “corpo” ao referencial de inserção do robô
- o ajustamento dos parâmetros de junta e do referencial da ferramenta (*tool centre point* – TCP)
- o estabelecimento dos limites dinâmicos de cada junta (aceleração, desaceleração e velocidade)

***Gripper* pneumático e estação de mudança de fixação (*regrip*)**

A modelação destes elementos nas suas respectivas aplicações é simplificada pelo recurso às bibliotecas de guias normalizadas e ventosas (que também têm aplicações dedicadas para a sua modelação). Uma vez modelado o objeto, pode-se definir o atraso (*delay*) na atuação e desativação dos sinais de comando. Pode-se ainda atribuir diferentes canais a cada elemento de preensão, o que é particularmente útil quando se

manipulam chapas/peças de diferentes tamanhos com o mesmo *gripper* e estação de mudança de fixação. Na Figura 59 mostra-se o gripper modelado para a manipulação da peça de teste (abordada adiante), com a afetação do canal de comando de uma ventosa.

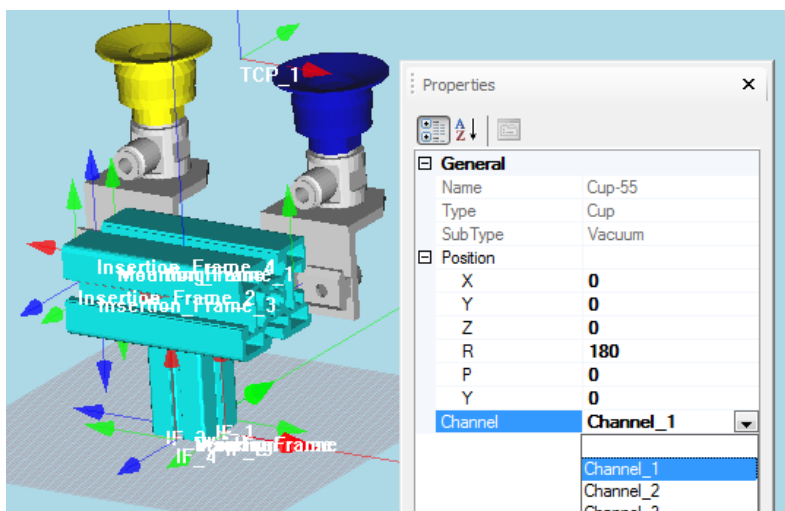


Figura 59 - *Gripper* pneumático modelado para a simulação com a célula da ADIRA

A modelação de objetos foi realizada com o intuito de simular o funcionamento da célula de quinagem da ADIRA. Neste equipamento constava uma quinadora da gama PF com comprimento útil de quinagem de 3 metros, um robô Motoman MH com capacidade de carga de 50 Kg, montado numa base rotativa VST600, uma mesa de carga para chapas planas, uma mesa de referência (ou esquadro) e um “Alimentador de Chapas” com detecção de dupla chapa. A célula tinha os elementos dispostos de acordo com a Figura 60.



Figura 60 - Disposição dos elementos na célula de teste da ADIRA

Para criar uma nova célula com vista à simulação do funcionamento desta, há que inserir os objetos respetivos à mesma, usando a aplicação “Cell Layout Manager”. Estes objetos têm forçosamente que constar nas bibliotecas do *software*. Uma vez inseridos, cada um dos objetos tem de ser posicionado e orientado adequadamente na célula virtual.

Este posicionamento pode ser feito com vista ao teste de soluções de disposição do equipamento, ou para se replicar uma célula existente. Neste caso, há a opção de se importar um ficheiro de calibração, com indicação da posição e orientação do referencial de base (*Main Frame*) de cada objeto em relação à base do robô, que representa a origem do referencial de base da célula. O software suporta ficheiros de calibração de formato neutro da ERXA (*.XML) e o gerado pelo controlo numérico da Motoman (UFRAME.CND – Figura 61).

```
//UFRAME 1
//NAME ESQUADRO
//TOOL 1
//GROUP 1,0,0,0,0,0,0
//PULSE
///RORG C000=0,0,0,0,0,0
///RXX C001=0,0,0,0,0,0
///RXY C002=0,0,0,0,0,0
///BUSER -1243.403,1649.366,421.338,59.80,-24.88,-13.18
```

Figura 61 - Excerto do código de ficheiro de calibração dos objetos da célula da Motoman

O software gera este último ficheiro, para configuração de outras células virtuais ou diretamente para o robô. Segundo a Figura 61, o referencial local UFRAME1 está descrito para o elemento ESQUADRO, com a sua definição na linha BUSER com as coordenadas (X, Y, Z, *Roll*, *Pitch*, *Yaw*) em milímetros, definidas em relação ao referencial global (base do robô). A definição de um referencial local através da consola de programação faz-se pela definição de 3 pontos, nomeadamente a origem (RORG), um ponto no eixo xx (RXX) e outro no plano xy (RXY), sendo estes pontos guardados em memória pelo número de impulsos do *encoder* (PULSE) de cada uma das 6 juntas referentes à posição em cada ponto (j1, j2, j3, j4, j5, j6).

Aquando da montagem de uma célula de quinagem na ADIRA, foram tiradas as medidas da posição temporária do equipamento (coordenadas do *layout*) considerado na simulação da célula, nomeadamente a quinadora, o robô, a mesa de referência e o quadro elétrico do robô (este último considerado para se evitarem colisões com o robô) para se modelar corretamente a célula virtual (Figura 62).

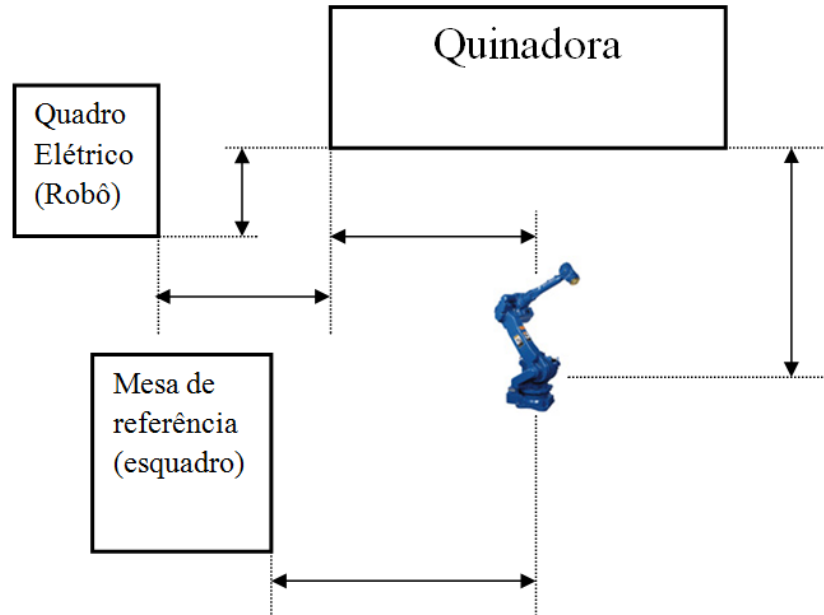


Figura 62 – Medição das distâncias entre elementos da célula real da ADIRA

Para efeitos de simulação, o ciclo de quinagem começa na mesa de referência, visto que com esta configuração de célula o “Alimentador de Chapas” deposita as chapas planas diretamente na mesa de referência e é a partir deste elemento que o robô vai interagir com a peça. A célula virtual modelada na aplicação “Cell Layout Editor” apresenta-se na Figura 63.

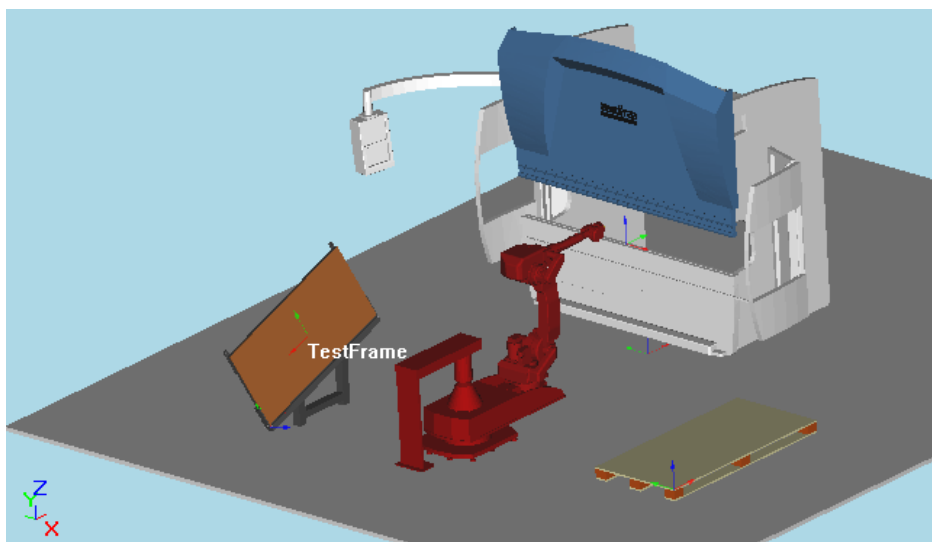


Figura 63 – Modelação da célula virtual de quinagem ADIRA

Nesta fase é possível adicionar um *gripper* ao robô e movimentá-lo para verificar os alcances aos vários objetos da célula virtual. Estes movimentos tanto podem ser realizados “junta-a-junta” ou por “arrasto” do TCP do robô. A aplicação “Multi Cell Manager” permite a gestão de 10 células diferentes, sendo que cada uma delas pode ter várias simulações gravadas. Assim, com o mesmo *layout* da célula pode-se simular separadamente ciclos de produção de peças (com as respetivas ferramentas do robô e quinadora), e testar diferentes sequências/configurações de quinagem da mesma peça, etc.

5.2.2 Simulação de ciclo de quinagem

Enquanto o robô era calibrado e não era ainda possível o acesso à célula, simulou-se no RoboWave uma sequência de quinagem com uma peça e um *gripper* existentes nas bibliotecas, de acordo com um *layout* temporário da célula. Este exercício serviu para uma maior familiarização com a utilização do software, que se refletiu numa utilização mais expedita do mesmo na posterior simulação com vista à implementação na célula real. Esta célula virtual continha os elementos típicos nesta tecnologia, incluindo o posto de mudança de fixação (*regrip*) a mesa de referência e o detetor de dupla chapa. O robô efetuava toda a manipulação da chapa desde a sua preensão na mesa de chapas planas (paleta de entrada) até à mesa de deposição de produtos acabados (paleta de saída) e visava simular a produção de uma caixa com 8 quinagens, duas em

cada bordo. Este exercício de simulação encontra-se ilustrado na Figura 64, com o rastreamento das trajetórias percorridas pelo TCP do robô a amarelo.

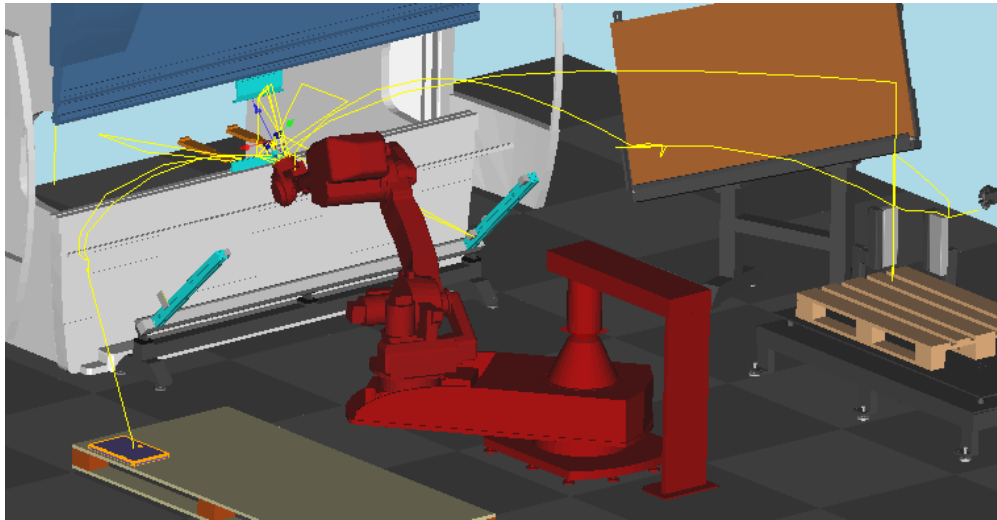


Figura 64 – Exercício de modelação da célula virtual de quinagem

A aplicação da edição de programação permite realizar a simulação gráfica do funcionamento da célula e a exportação dos programas gerados na linguagem da quinadora e do robô. Após afetar a peça existente na biblioteca à célula na aplicação de programação, utiliza-se esta aplicação de acordo com o procedimento descrito na Figura 65.

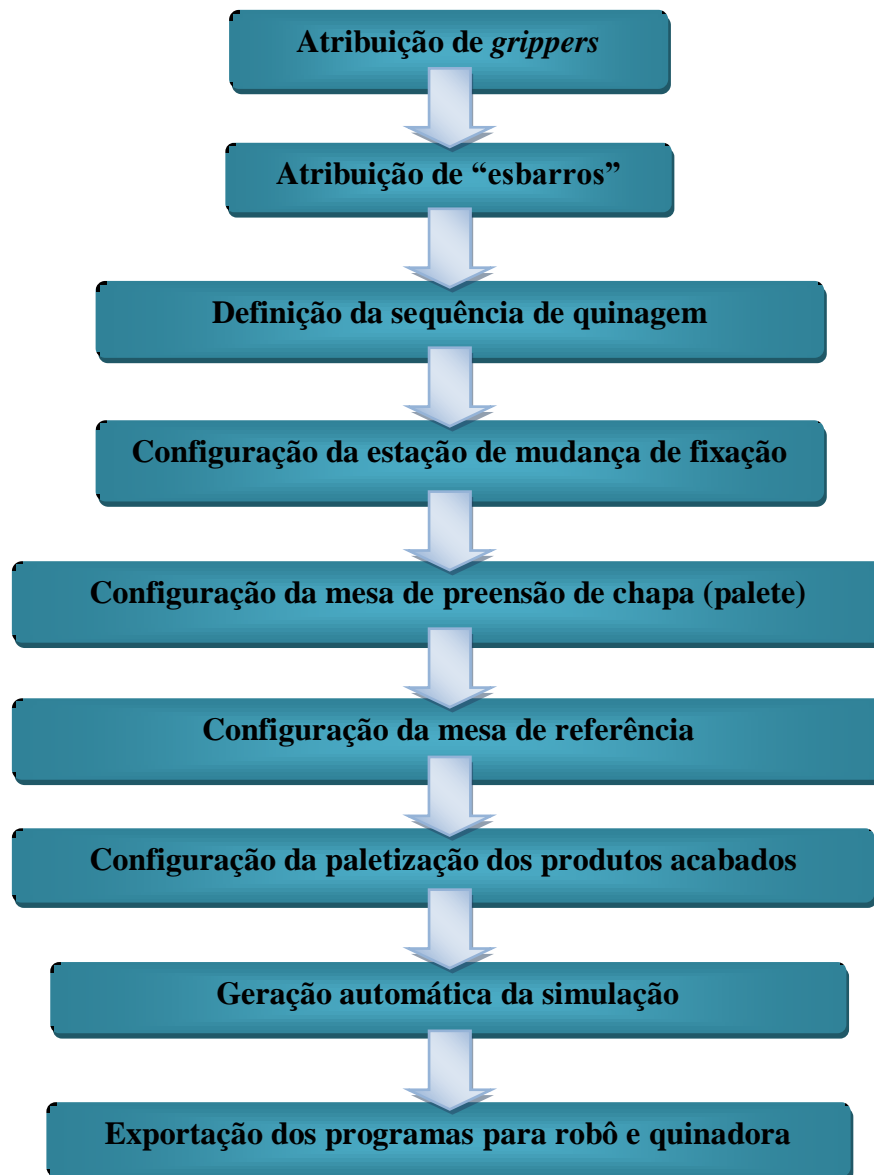


Figura 65 - Sequência de utilização da aplicação de programação do RoboWave Bending

Para a produção de uma dada peça, podem-se testar vários *grippers* do robô e esbarros da quinadora. Os primeiros passos passam pela afetação destes objetos ao robô e quinadora, de um modo bastante simples.

Sequência de quinagem

A definição da sequência de quinagem faz-se de forma automática, com possibilidade de se otimizar alguns parâmetros:

1. Ordem das quinagens - da periferia da peça para o centro da peça (ou o contrário), minimização de mudanças de fixação.
2. Punções e matrizes - cálculo pode ser baseado com base em ferramentas pré-selecionadas, quinagem convencional ou invertida (punção no avental inferior), alinhamento das ferramentas (esquerda, centro ou direita), distância entre pares de ferramentas, otimização do comprimento da ferramenta
3. Esbarros - *offsets* dos esbarros por razões de segurança, largura máxima da superfície da peça para lhe ser atribuído um só esbarro numa quinagem

Todo o processo pode ser alterado manualmente após o cálculo automático e reconfigurado automaticamente após alterações, como por exemplo, recalcular o posicionamento dos esbarros em função de alterações na disposição dos punções e matrizes, com visualização gráfica de todas as alterações.

Preensão de chapa plana

Neste passo define-se o posicionamento e orientação da chapa plana na palete (em relação ao referencial local desta), e a posição do robô relativamente à chapa na posição de preensão, conforme ilustrado na Figura 66.

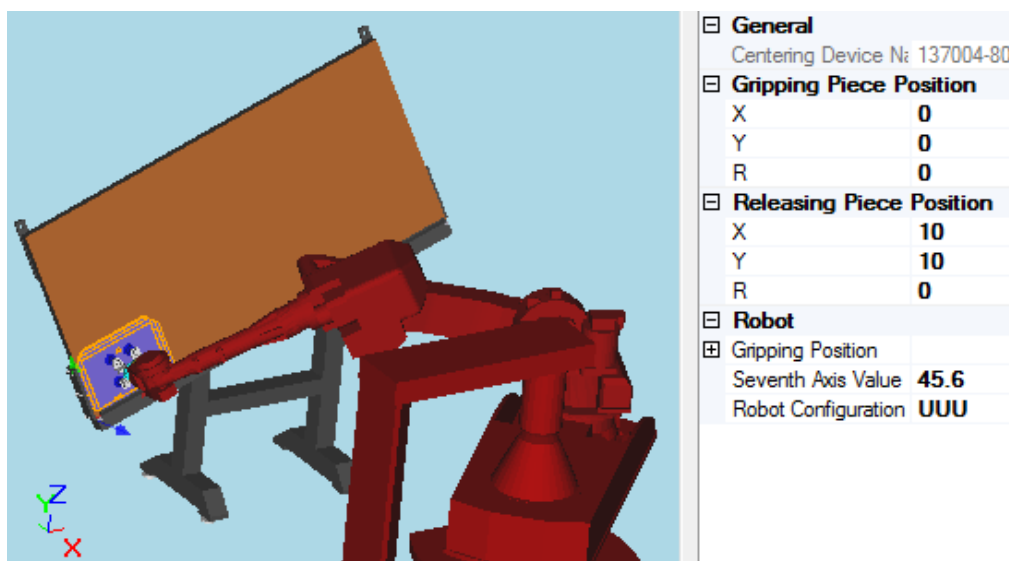


Figura 66 – Definição da preensão de chapa plana

A configuração utilizada para simulação da célula real prevê a prensão diretamente na mesa de referência, pelo que se orientou a paleta de acordo com a orientação da mesa de referência com recurso a medição aproximada.

Paletização

A paletização dos produtos acabados foi configurada com uma só paleta, visando a maximização do aproveitamento da área disponível para o acondicionamento de peças, com *offsets* para os limites da paletes e entre chapas e acondicionamento em dois níveis. No entanto, e apesar de ser possível definir estratégias de paletização bastante complexas, a simulação de todo o ciclo faz-se para uma só peça, pelo que se abandonou o conceito e se reprogramou para uma só peça, posicionada na zona central da paleta. A Figura 67 ilustra a configuração desta posição.

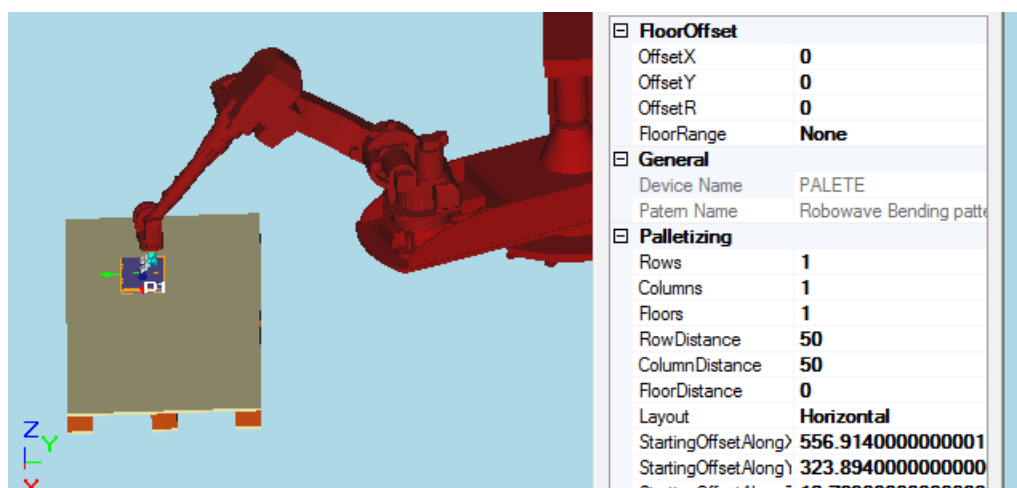


Figura 67 – Definição da paletização de produtos acabados

Programação

Após a definição da sequência de quinagem e a configuração dos restantes elementos da célula, pode-se então gerar o programa de ensino do robô, que contém a definição de todos os seus movimentos ao longo do ciclo de quinagem. Esta geração é feita de forma automática, e poderá retornar eventuais erros na geração de trajetórias. O programa do robô é esquematizado segundo uma árvore de dependências, que representa a própria estrutura da programação (Figura 68) e pode ser corrido e modificado através de simulação gráfica.

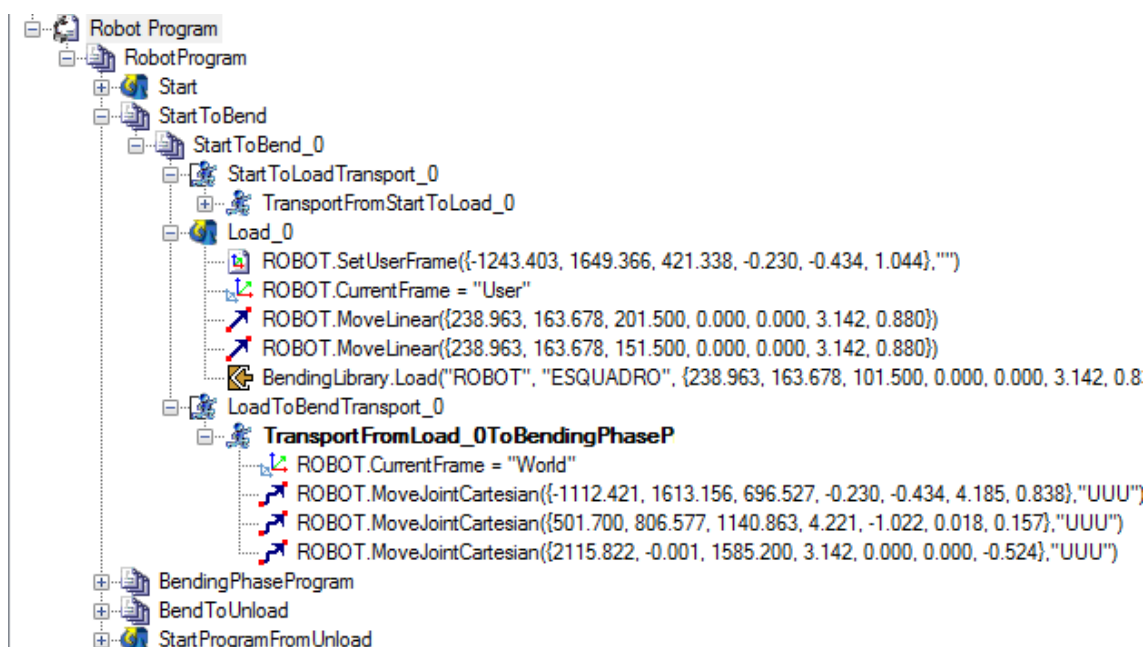


Figura 68 – Estrutura do programa gerado para simulação gráfica

A programação consiste numa série de subprogramas chamados “de fase” ou “de transporte”. Os subprogramas de fase definem movimentos lineares do robô entre pontos (instruções *moveL* na linguagem INFORM II) e interações com equipamentos da célula.

Os subprogramas de transporte, como o nome indica, contêm instruções de transporte entre postos onde ocorrem as funções “de fase”, com movimentos descritos por interpolação de junta (instruções *moveJ*). É possível alterar a posição/orientação de pontos a serem visitados pelo robô, criar novos pontos e eliminar pontos existentes, de modo a condicionar as trajetória descritas pelo robô. Na Figura 69 pode-se ver a amarelo a trajetória do elemento terminal do robô numa instrução de movimentação de transporte entre 2 pontos, com interpolação de juntas.

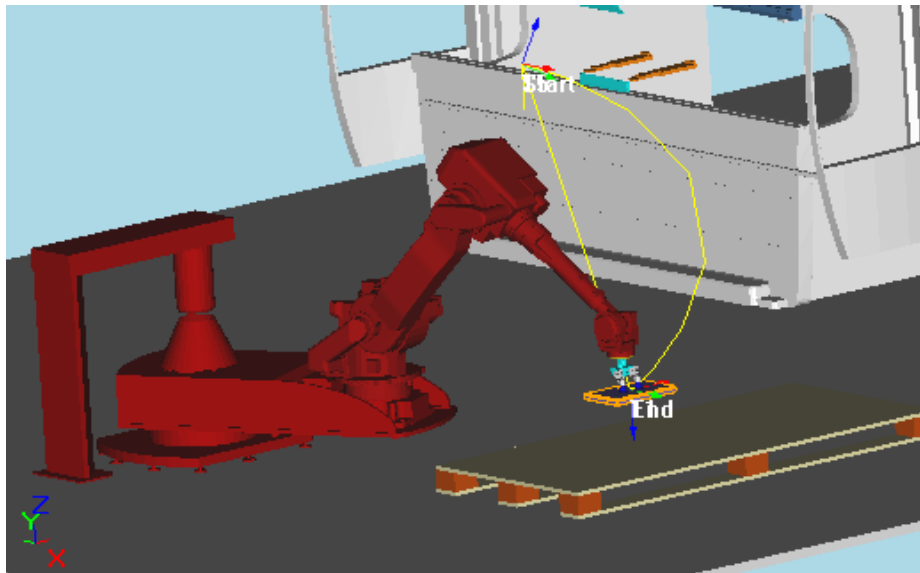


Figura 69 - Visualização da trajetória descrita entre pontos num movimento “de transporte”

Os subprogramas de fase definem movimentos em que o robô interage com outro equipamento, sendo de esperar na programação, linhas de código referentes à interação com os IOs do equipamento. As trajetórias geradas são sempre lineares, de modo a serem o mais previsíveis possível. A Figura 70 ilustra um movimento de aproximação do robô à quinadora para se iniciar uma quinagem.

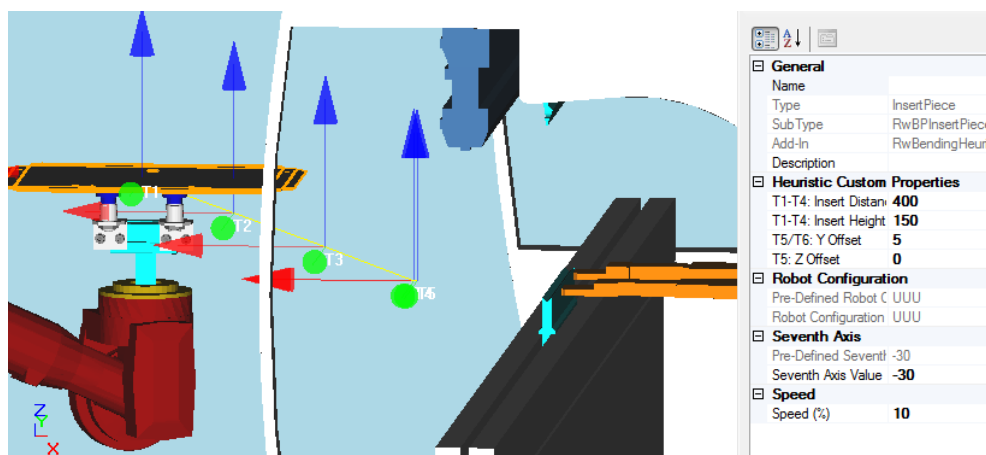


Figura 70 - Visualização da trajetória descrita entre pontos num movimento “de fase”

Estas trajetórias lineares são criadas por via de algoritmos heurísticos, cujos parâmetros podem ser modificados na janela de propriedades, também visível na Figura 70. Cada fase definida na programação tem por base uma regra heurística, como a prensão de chapa plana, deteção de dupla chapa, centragem, aproximação à quinadora, quinagem com acompanhamento, etc. Estas regras podem ser configuradas e guardadas conforme as configurações do utilizador para utilização em casos específicos.

A simulação gráfica do processo de quinagem pode ser efetuada passo a passo, por seleção da tarefa desejada na árvore de programação ou pode-se simular o ciclo completo, com a obtenção de uma estimativa do tempo de ciclo. Esta estimativa é particularmente útil como medida da otimização da simulação criada.

5.2.3 Teste na célula real

A programação da quinadora na linguagem do controlo numérico utilizado pode ser obtida por pós-processamento da programação interna do software logo após a configuração da sequência de quinagem. Os formatos admitidos são o formato neutro do RoboWave Bending, *.XML e o dos controlos numéricos Cybelec, *.CXF. O pós-processamento foi escolhido para este último, dado ser este o equipamento presente na quinadora da célula de teste. No entanto, a quinadora não se encontrava ainda configurada na altura, de modo que a validação foi realizada através de um software de programação *off-line* da Cybelec existente na ADIRA, sem ocorrência de erros.

A programação do robô foi exportada na linguagem INFORM II, levando à criação de uma pasta com os subprogramas com correspondência com a estrutura da árvore da aplicação de programação. Além destes programas, 67 no total (referentes ao bloco **PIECE PRODUCTION LIBRARY** da estrutura de programação do Robowave Bending) foram exportados também o ficheiro que continha a definição dos referenciais locais usados na modelação (UFRAME.CND) e um outro de informação sobre a simulação (**PPL**Info.xml).

Os ficheiros PPL e UFRAME foram então transferidos para o robô através de uma *pen-drive* e posteriormente compilados através da consola de programação manual do robô. Deu-se então lugar ao processo de despistagem de erros da programação, com implicações na própria simulação e programação. Neste processo houve a necessidade de estudar os manuais de programação em INFORM II da Motoman para identificar a origem dos erros e a correção destes. Deu-se início a um processo iterativo descrito na Figura 71.

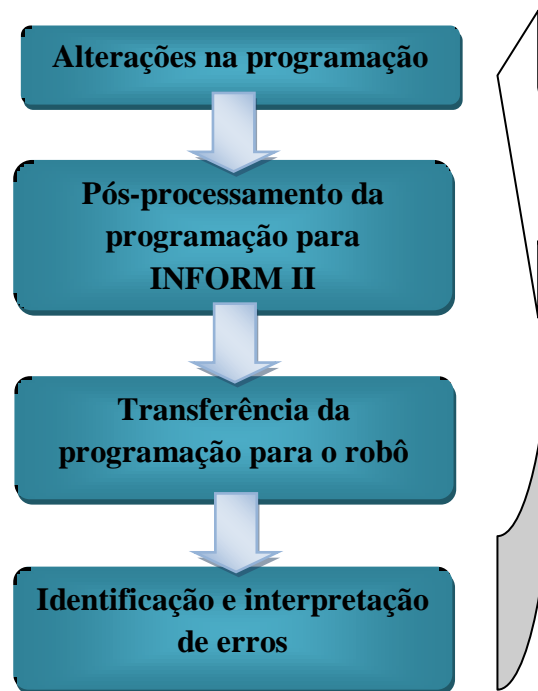


Figura 71 – Procedimento de testes na célula real e despiste de erros

Conseguiu-se implementar a programação oriunda do RoboWave Bending com recurso à criação dos restantes blocos da estrutura, nomeadamente o bloco MAIN e o bloco BEND LIBRARY. Seguindo o procedimento de despiste sucessivo de erros, conseguiu-se chegar a um patamar de movimentação realista do robô nas funções de transporte (coordenadas em impulsos dos *encoders*) de acordo com a simulação, ainda que com um observável desfasamento entre a simulação e realidade quando as coordenadas do robô eram definidas nos referenciais locais dos elementos da célula (coordenadas cartesianas).

Alguns impedimentos de ordem técnica descritos no ponto seguinte, aliados à limitação do tempo disponível para os testes na célula real, impediram que a fase de testes fosse levada até ao nível previsto. A comparação efetiva entre a simulação em ambiente virtual e a sua plena implementação ficou assim limitada.

5.3 Dificuldades na implementação e resolução de problemas

5.3.1 Modelação de objetos

Sentiu-se alguma dificuldade em realizar a importação de novas peças para quinagem, dado não haver acesso aos softwares “Bend Wizard”, “CyCad” e à aplicação da Trumpf. A extensão *.dxf, dado ser um formato neutro, levava a crer que um software de CAD corrente poderia exportar um perfil 2D com distinção entre os *layers* de contorno e quinagem. Com a edição de uma peça existente na biblioteca do RoboWave Bending através de um editor de ficheiros *.dxf, conclui-se que aceitação deste formato carecia de uma formatação específica. Após alguma pesquisa chegou-se à conclusão que o CyCad era um formato duma aplicação da Cybelec para importação de perfis 2D para os seus comandos numéricos. Uma vez acedido este software, a importação correu sem problemas.

A Ferramenta de CAD do software em estudo revelou-se pouco intuitiva na modelação de objetos, comparativamente com os softwares de CAD correntes. Enquanto a modelação de *grippers* e objetos simples é mais evidente, os casos do robô e da quinadora são particularmente custosos. O suporte técnico da ERXA forneceu modelos de uma quinadora da ADIRA e de um robô MOTOMAN UP-50, bastante similar ao MH-50 utilizado, montado no mesmo modelo do 7º eixo utilizado. Utilizaram-se assim estes modelos do robô e da quinadora na simulação. Neste ponto do desenvolvimento do software, recomenda-se a importação de modelos suficientemente detalhados com outro software de CAD, com recurso a eventuais pequenas modificações

5.3.2 Simulação e programação

As trajetórias geradas automaticamente davam lugar a alguns movimentos “descontrolados” durante a fase de transportes entre postos, pelo que nestes casos se condicionou a movimentação com adição/edição de pontos. O mesmo se passava com o posicionamento do 7º eixo, que trocava constantemente de posição durante a execução de movimentos de curta amplitude, pelo que se “impôs” a sua posição na programação

ao longo de todo o ciclo. Estas alterações na programação permitiram reduzir substancialmente o tempo de ciclo simulado.

Durante o exercício de simulação referido no início do ponto 5.2.2 verificou-se uma tendência para se atingir o limite do curso da 5ª junta do robô, durante as fases de acompanhamento de chapa ou re-preensão após quinagem (Figura 72).



Figura 72 – Esforço da 5ª junta do robô durante a fase de quinagem (www.adira.pt)

Concluiu-se portanto que uma forma de contrariar esta dificuldade seria a de elevar a quinadora, visto não ser prático baixar a base do robô. Esta constatação viria a ser confirmada na célula de teste da ADIRA, já que este procedimento é habitual na configuração das suas células de quinagem. Constatou-se também nesta fase que a imobilização do robô numa posição horizontal levava a um grande abrandamento na sua movimentação, pelo que se evitaram estas posições com a manipulação de trajetórias pela adição de pontos extra.

Durante a fase de simulação com a aplicação de programação, foi detetado um erro (*bug*) no programa, com a verificação de que a funcionalidade “Jump To Target” não funcionou.

A funcionalidade de deteção de colisões do software funciona como um aviso gráfico, em que os objetos colididos mudam de cor em tempo real, mas o software não evita as colisões nem as corrige automaticamente. Uma colisão pode passar despercebida se ocorrer um choque tangencial entre elementos, num movimento rápido, pelo que se diminuiu a velocidade da simulação sempre que se suspeitava da existência de colisões num dado ponto do programa.

Na eventualidade de o operador querer alterações às operações, existe alguma liberdade para configurar as regras heurísticas que definem a geração das trajetórias, pela alteração das distâncias entre os pontos predefinidos nessas regras ou a orientação de pontos nalguns casos, sendo que a adição de novos pontos é perdida sempre que se reinicia uma nova simulação. O software permite guardar essas alterações para usos futuros, mas alterações mais profundas terão que ser realizadas por manipulação direta do código gerado na linguagem do robô, com a versão testada. Existe uma opção comercial extra (*add-in*) para a criação das regras heurísticas, às quais não se teve acesso.

Não existe no RoboWave Bending um menu para fazer a gestão dos IOs do equipamento com que o robô interage na célula, já que estes são definidos diretamente nos programas da BEND LIBRARY (a cargo do utilizador ou integrador de sistemas), já que e a versão testada do software só gera a programação na linguagem do robô referente ao bloco PIECE PRODUCTION LIBRARY.

5.3.3 Implementação na célula real

Aquando da análise dos programas do robô para serem testados na célula real, verificou-se que de facto os blocos MAIN e BEND LIBRARY não foram gerados, já que a versão do software disponibilizada não incluía estes blocos. Existia sim uma rotina principal que fazia as chamadas às outras sub-rotinas do bloco PIECE PRODUCTION LIBRARY, de modo a se fazer o encadeamento da programação, de acordo com a árvore da aplicação de programação do software.

A solução encontrada para colmatar a falta do bloco BEND LIBRARY foi a de criar programas na linguagem do robô com os mesmos nomes dos programas “chamados” na programação gerada, de modo a que retornassem ao mesmo subprograma após a chamada. Numa primeira fase estes programas fictícios continham temporizadores de 5 segundos para se ter uma ideia do seu papel quando se testava a programação do software na célula real, sendo que posteriormente se iria efetivamente usar os procedimentos da ADIRA na interação com o restante equipamento da célula.

Segundo a lógica de programação do software, todos os movimentos “de fase” são mapeados em relação aos referenciais locais dos objetos (quinadora, paletes, etc.).

Aconselha-se portanto uma medição cuidada do posicionamento destes elementos na célula, e consequente importação do ficheiro de calibração para o RoboWave. A medição das posições relativas dos elementos da célula real não foi realizada com grande rigor, de modo a aproveitar ao máximo a disponibilidade do mesmo para os testes. Este fator não contribuiu assim para a obtenção de um posicionamento suficientemente aceitável do robô para se poder testar a interação do mesmo com outros elementos da célula (preensão de chapa, interação com a quinadora, etc.)

Para cada simulação o pós-processador do software gerou um número elevado de subprogramas em INFORM II relativos ao bloco PPL (67 programas para o caso de teste de uma peça com 8 quinagens), tornando-se morosa a edição da programação na consola do robô. Quando se quer testar na célula uma nova simulação, a eliminação dos programas anteriores tem que ser realizada individualmente, já que na consola os programas têm todos que ter nomes diferentes, e o RW exporta a programação sempre com as mesmas denominações.

A denominação dos objetos da célula tem que ser consistente com o ficheiro de configuração do pós-processador para linguagem INFORM II, pelo que este ficheiro tem que ser cuidadosamente editado para que os referenciais locais dos objetos na célula sejam reconhecidos.

No início dos testes com a célula real, o robô imobilizava-se nos movimentos “de transporte”. Ao recorrer-se ao suporte técnico da ERXA, compreendeu-se que a lógica do software passa por gerar para estes movimentos uma referência em graus (°) para cada eixo, sendo que as referências em “impulsos do *encoder*” são obtidas através de um fator de conversão, de graus para impulsos, definido no ficheiro de configuração do pós-processador para INFORM II. Este ficheiro não se encontrava configurado e, na falta de acesso a estes fatores de conversão dos eixos na documentação Motoman, foram realizados alguns testes com o robô real.

Numa primeira fase realizaram-se movimentações com o robô eixo a eixo, de amplitude fixa (90 e 180 graus), com a visualização dos “impulsos do *encoder*” relativos a cada posição. Estes resultados permitiram já alguma movimentação do robô, ainda com um desfasamento considerável em relação à simulação e obtenção de erros de interpolação e cinemática inversa na consola. De seguida, levou-se cada eixo à sua posição extrema, que correspondia aos limites impostos internamente por software, de

amplitude angular conhecida, e anotou-se as referências dos impulsos para cada posição. Esta segunda estratégia levou à obtenção de fatores de conversão que permitiram um posicionamento bem mais aproximado em relação à simulação.

Durante os testes na célula real, os eixos do robô real atingiam frequentemente os seus limites quando na simulação isso não acontecia. Tal poderia ser devido a que se realizaram as simulações com um robô ligeiramente diferente do utilizado na célula real, devido à mudança do robô por parte do fornecedor, além do que o robô na célula de teste tinha limitação do curso dos eixos imposta pelo seu software. A solução encontrada passou pela alteração do modelo do robô no software em teste, pela diminuição da amplitude do movimento dos seus eixos.

Nas funções “de fase”, o robô não atingia as posições desejadas ou atingia os fins-de-curso dos seus eixos na tentativa de as alcançar, devido ao incorreto posicionamento do eixo suplementar, ou 7º eixo (Figura 73). Nestas funções, os pontos a alcançar são mapeados em função dos referenciais locais dos elementos da célula e os pontos são definidos por programação em coordenadas cartesianas para o robô, e em graus para o 7º eixo.

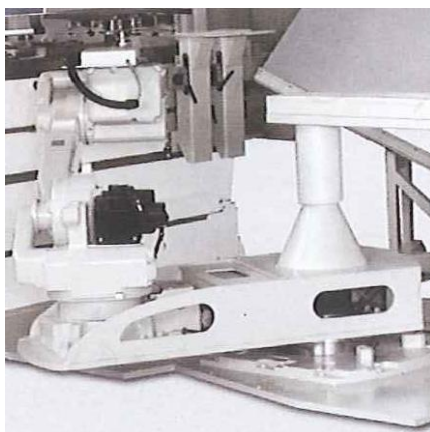


Figura 73 – Eixo suplementar do robô Motoman utilizado nos testes

Após alguns testes na movimentação por consola do 7º eixo por estas funções, chegou-se à conclusão de que este eixo se movimentava numa amplitude 10 vezes inferior à do comando. Esta diferença de resolução pode ser justificada pelas diferenças na lógica de funcionamento do controlador Motoman DX100, utilizado na célula real, e na sua versão anterior NX100, que foi provavelmente a que serviu de referência no desenvolvimento do pós-processador da ERXA para robôs Motoman. Esta discrepância foi corrigida por alteração manual dos programas gerados pelo pós-processador, nas

referências em graus do posicionamento do 7º eixo, pela multiplicação das referências por 10 (teria que se dar ao robô uma referência de 50 graus para este se movimentar para a posição de 5 graus).

6 Conclusões e trabalhos futuros

6.1 Conclusões

A mudança de *setup* em células de quinagem, ou preparação do equipamento para a produção de uma nova peça, pode ser agilizada com recurso a *softwares* de simulação e programação *off-line* para robô e quinadora.

A ferramenta testada, o RoboWave Bending, revelou potencial para dar um grande contributo nesta área. No entanto, a experiência da utilização foi dificultada pela falta de acesso a algumas funcionalidades (*add-ins*) não disponibilizadas e por alguma insuficiência do suporte técnico do robô utilizado, pelo que não se atingiu o nível de implementação desejado.

A ferramenta de CAD revelou-se simples de utilizar na definição de *layouts* e edição de peças simples, revelando-se pouco eficiente na modelação de elementos mais complexos. A nível da simulação não foi possível testar os procedimentos da ADIRA devido às limitações impostas pelo software no ensino do robô, já que as alterações às trajetórias geradas automaticamente eram condicionadas, ora pela lógica de funcionamento do software (movimentação entre postos segundo interpolação a nível das juntas do robô), ora pela ausência da funcionalidade de definição completa dos movimentos em que robô interage com outros equipamentos (durante a sequência de quinagem, com a mesa de posicionamento, etc.).

Constatou-se que a correta calibração da célula e importação dos dados para o software são essenciais para o correto funcionamento do programa, bem como o conhecimento das características de hardware do robô (relação entre a amplitude angular e os impulsos no *encoder* de cada junta) e a robustez do modelo dinâmico do robô simulado.

A ferramenta de software testada pode tornar-se especialmente interessante para quem procura trabalhar com células de quinagem com pequenas séries, sendo no entanto endereçada a todos os utilizadores de células de quinagem. Sentiu-se que foi feita uma contribuição no processo de melhoria contínua do software, por partilha da experiência de teste e identificação de erros no seu funcionamento com o suporte técnico da marca.

6.2 Trabalhos futuros

O trabalho realizado pode ser levado mais adiante, com a disponibilização dos meios já referidos. Encontra-se entretanto disponível a versão 1.2 do RoboWave Bending (1.2), pelo que algumas das falhas apontadas poderão já estar resolvidas ou melhoradas.

A comparação da utilização dos diferentes softwares de programação *off-line* em células de quinagem seria um bom exercício para se fazer um ponto da situação a nível desta tecnologia. Poder-se-ia fazer uma comparação em simulação e programação do mesmo equipamento entre softwares independentes e/ou entre softwares proprietários de fabricantes de robôs e softwares independentes.

A mudança automática de ferramentas do robô e quinadora não foi abordada muito a fundo neste documento. Um estudo da viabilidade destes sistemas em células de quinagem, na produção de peças de diferentes complexidades com diferentes tamanhos de série, seria também pertinente.

7 Referências bibliográficas

- [1] **Rodrigues, J. e Martins, P.** (2005) “Tecnologia mecânica - Tecnologia da Deformação Plástica vol.ii - Aplicações Industriais. Escolar Editora, 2005.
- [2] **Press Brake**[Online] http://en.wikipedia.org/wiki/Press_brake (consultado em 09/02/2011)
- [3] **S.K. Gupta, D.A. Bourne, K. Kim, and S.S. Krishnan.** Automated process planning for sheet metal bending operations. Journal of Manufacturing Systems, 17(5):338-360, 1998.
- [4] **Adira** [Online] www.adira.pt (consultado em 16/02/2011)
- [5] **Automação Industrial** [Online] http://pt.wikipedia.org/wiki/Automa%C3%A7%C3%A3o_industrial (consultado em 09/02/2011).
- [6] **Automation** [Online] <http://en.wikipedia.org/wiki/Automation> (consultado em 09/02/2011).
- [7] **Press Brakes and Robots** [Online] http://www.robotics.org/content-detail.cfm/Industrial-Robotics-Feature-Article/Press-Brakes-and-Robots/content_id/2779 (consultado em 22/02/2011)
- [8] **Abreu, Paulo. (2001).** “Aplicações industriais de robôs”. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto: s.n., 2001. Textos de Apoio.
- [9] **Abreu, Paulo. (2001).** “Programação de robôs”. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto: s.n., 2001. Textos de Apoio.
- [10] **Motta, J. M. Sousa, C. A. Afonso F. A.** “An off-line robot programming system including workcell and robot calibration”, ABCM Symposium Series in Mechatronics – Vol.1, pp. 134-143, 2004

Robotic Sheet Metal Bending [Online]

<http://www.cimindustry.com/article/bending/robotic-sheet-metal-bending> (consultado em 11/02/2011)

RoboWave Bending [Online]

http://www.robowave.com/index.php?option=com_content&view=article&id=54&Itemid=72&lang=en (consultado em 14/02/2011)

- RW Bending Tutorial
- RW Bending Technical Presentation, Setembro 2010
- RW Bending Product Description, atualizado em Maio 2011

Anexo

QUESTIONÁRIO SOBRE A PROGRAMAÇÃO DE CÉLULAS DE QUINAGEM ADIRA

Foram identificados os pontos críticos de uma mudança de referência, ou os maiores consumidores de tempo quando se quer reprogramar a célula para produzir uma nova peça.

Por favor preencha os campos seguintes:

IDENTIFICAÇÃO DO CLIENTE

1.1-**Número de secções** de peça:

Uma	<input type="text"/>
Duas	<input type="text"/>
Três	<input type="text"/>

1.2-**Ângulos de quinagem** mais habituais (classificar):

	1	2	3	4	Não realizado
90°	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
120	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
135°	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
60°	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>

1.3-**Número de quinagens** por peça:

Uma	<input type="text"/>
Duas	<input type="text"/>
Três ou quatro	<input type="text"/>
Mais de quatro	<input type="text"/>

1.4-**Quinagens especiais** (esmagamentos, pré-quinagens, outros)

Nunca	<input type="text"/>
Por vezes	<input type="text"/>
Muitas vezes	<input type="text"/>

1.5-Tamanho da série/lote (escolha uma opção):

Menos de 10 peças	<input type="checkbox"/>
Entre 10 a 50 peças	<input type="checkbox"/>
Entre 50 a 100 peças	<input type="checkbox"/>
Mais de 100 peças	<input type="checkbox"/>

1.6-Número de mudanças de fixação ("regrip"), por peça:

Zero	<input type="checkbox"/>
Uma	<input type="checkbox"/>
Duas ou três	<input type="checkbox"/>
Mais de Três	<input type="checkbox"/>

2. Tempos actuais consumidos e grau de importância
atribuído, nas seguintes tarefas:

2.1-Programação do robot

Tempo consumido, em minutos
(escolha uma opção):

Menos de 10 minutos	<input type="checkbox"/>
Entre 10 a 30 minutos	<input type="checkbox"/>
Entre 30 a 60 minutos	<input type="checkbox"/>
Entre 60 a 90 minutos	<input type="checkbox"/>
Entre 90 a 120 minutos	<input type="checkbox"/>
Mais de 120 minutos	<input type="checkbox"/>

Grau de importância atribuído à
tarefa (escolha uma opção):

Muito importante	<input type="checkbox"/>
Importante	<input type="checkbox"/>
Pouco importante	<input type="checkbox"/>
Muito pouco importante	<input type="checkbox"/>

(comentários)

2.2-Programação da quinadora

Tempo consumido, em minutos
(escolha uma opção):

- | | |
|------------------------|--------------------------|
| Menos de 10 minutos | <input type="checkbox"/> |
| Entre 10 a 30 minutos | <input type="checkbox"/> |
| Entre 30 a 60 minutos | <input type="checkbox"/> |
| Entre 60 a 90 minutos | <input type="checkbox"/> |
| Entre 90 a 120 minutos | <input type="checkbox"/> |
| Mais de 120 minutos | <input type="checkbox"/> |

Grau de importância atribuído à
tarefa (escolha uma opção):

- | | |
|------------------------|--------------------------|
| Muito importante | <input type="checkbox"/> |
| Importante | <input type="checkbox"/> |
| Pouco importante | <input type="checkbox"/> |
| Muito pouco importante | <input type="checkbox"/> |

(comentários)

2.3-Mudança de ferramentas da quinadora (posicionamento e ajuste)

Tempo consumido, em minutos
(escolha uma opção):

- | | |
|------------------------|--------------------------|
| Menos de 10 minutos | <input type="checkbox"/> |
| Entre 10 a 30 minutos | <input type="checkbox"/> |
| Entre 30 a 60 minutos | <input type="checkbox"/> |
| Entre 60 a 90 minutos | <input type="checkbox"/> |
| Entre 90 a 120 minutos | <input type="checkbox"/> |
| Mais de 120 minutos | <input type="checkbox"/> |

Grau de importância atribuído à
tarefa (escolha uma opção):

- | | |
|------------------------|--------------------------|
| Muito importante | <input type="checkbox"/> |
| Importante | <input type="checkbox"/> |
| Pouco importante | <input type="checkbox"/> |
| Muito pouco importante | <input type="checkbox"/> |

(comentários)

2.4-Mudança de ferramentas do robot ("grippers")

Tempo consumido, em minutos
(escolha uma opção):

- Menos de 10 minutos ☐
- Entre 10 a 30 minutos ☐
- Entre 30 a 60 minutos ☐
- Entre 60 a 90 minutos ☐
- Entre 90 a 120 minutos ☐
- Mais de 120 minutos ☐

Grau de importância atribuído à
tarefa (escolha uma opção):

- Muito importante ☐
- Importante ☐
- Pouco importante ☐
- Muito pouco importante ☐

(comentários)

2.5-Programação do processo de paletização

Tempo consumido, em minutos
(escolha uma opção):

- Menos de 10 minutos ☐
- Entre 10 a 30 minutos ☐
- Entre 30 a 60 minutos ☐
- Entre 60 a 90 minutos ☐
- Entre 90 a 120 minutos ☐
- Mais de 120 minutos ☐

Grau de importância atribuído à
tarefa (escolha uma opção):

- Muito importante ☐
- Importante ☐
- Pouco importante ☐
- Muito pouco importante ☐

(comentários)

3. **Sugestões** para a melhoria do funcionamento das células da quinagem, ao nível de:

3.1-Programação da quinadora:

(sugestões)

3.2-Programação do robot:

(sugestões)

3.3-Dispositivos da célula:

(sugestões)

3.4-Outros:

(sugestões)

Obrigado pela sua colaboração